

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Aktuální stav a budoucnost technologií pro výrobu
dopravních letounů

Current and Future Technology Development in Aircraft
Production

Student: Tomasz Jelen
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Horecký, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomasz Jelen

Studijní program:

B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor:

3708R036 Technologie letecké dopravy

Téma:

Aktuální stav a předpokládaný vývoj technologií pro výrobu dopravních letounů

Current and Future Technology Development in Aircraft Production

Zásady pro vypracování:

- 1) Analyzujte současně vyráběné typy letadel zařazených do obchodní letecké dopravy s ohledem na používané výrobní technologie.
- 2) Zpracujte přehled nově používaných technologií zaváděných do výroby moderních dopravních letounů.
- 3) Porovnejte výše uvedené rozdíly a určete směr vývoje leteckých konstrukcí, které by se mohly uplatnit u výrobců letadel v časovém horizontu nejbližších 15 let.
- 4) Proveďte konkrétní zhodnocení některé z uvedených technologií pro výrobu letounu s vlastním komentářem.

Cíl BP: Vypracovat studii aktuálního stavu a předpokládaného vývoje technologií pro výrobu dopravních letounů v nejbližších 15 letech

Seznam doporučené odborné literatury:

Holub, R., Wintř, Z.: Spolehlivost letadlové techniky (elektronická učebnice), Brno: VUT Brno, 2001.

Výklad organizace údržby letadel leteckých údržbových organizací (JOB AIR Technics, Czech Airlines Technics, atd.)

Nařízení komise ES č. 2042/2003 v aktuálním znění - část 145: Organizace údržby. Evropská komise, 2003
Program údržby letounu Boeing 737.

JOB AIR Technics: Engineers training manual illustration book

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Rostislav Horecký, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2013

Tomáš Jeřek

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20.5.2013

Tomasz Jelen
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomasz Jelen

Adresa trvalého pobytu autora práce: Dolní Těrlicko 89, Těrlicko 73542

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jelen,T. Aktuální stav a předpokládaný vývoj technologií pro výrobu dopravních letounů: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Ústav letecké dopravy, 2013, 61 s. Vedoucí práce: Horecký, R.

Tato bakalářská práce se zabývá technologiemi používanými pro výrobu dopravních letounů. První část se věnuje rozdělení a způsobem výroby letadel. Dále následuje popis vybraných technologií. Hlavní pozornost se zaměřuje na kompozity a jiné lehké materiály, které v poslední době nacházejí stále větší uplatnění v leteckých konstrukcích, jejich výrobu a problematiku zpracování. Na závěr jsou uvedeny některé technologie, které by se mohly uplatnit u výrobců letadel v horizontu nejbližších 15 let jako je například technologie elektropohonu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Jelen,T. Current and Future Technology Developement in Aircraft Production: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Air Transport, 2013, 61 s. Thesis head: Horecký, R.

This bachelor thesis deals with technologies used for production of transport aircrafts. The first part deals with distribution and manufacturing method of the aircrafts. This is followed by a description of selected technologies. The main attention is focused on composites and other lightweight materials, which recently found increasing application in aircraft constructions, their production and processing issues. At the end some of the technologies that could be applied by aircraft manufacturers within the next 15 years are listed such as electric drive technology.

Obsah

Seznam zkratek	8
1. Úvod	10
2. Analýza způsobu výroby letadel.....	11
2.1 Rozdělení letadel	11
2.2 Strategie návrhu výroby letadla	12
2.3 Požadavky na konstrukci letadla	14
a) Pevnost	14
b) Tuhost	14
c) Spolehlivost.....	14
d) Minimální hmotnost.....	15
e) Plné využití materiálu	15
f) Technologické požadavky	15
g) Aerodynamická čistota.....	15
3. Technologie ve výrobě moderních letadel	16
3.1 Obecná klasifikace materiálů na letadla.....	16
h) Slitiny hliníku.....	16
i) Slitiny hořčíku.....	17
j) Oceli.....	17
k) Slitiny titanu.....	17
l) Kompozitní materiály	17
3.2 Vysokorychlostní obrábění	18
4. Nové směry vývoje letadel.....	19
4.1 Kompozitní materiály.....	19
4.2 Rozdělení vláknových kompozitů.....	20
a) Kompozity s polymerní matricí (PMC)	21
b) Kompozity s kovovou matricí (MMC)	22
c) Kompozity s keramickou matricí (CMC)	22
4.3 Aplikace vláknových kompozitů.....	23
4.4 Technologie výroby kompozitních celků letadla	28

a)	Ruční nanášení	28
b)	Nanášení stříkáním.....	29
c)	Vakuové lisování	30
d)	Navíjení vláken	31
e)	Pultruze	32
f)	Metoda RTM.....	33
g)	Prepregy	34
h)	Nízkoteplotní vytvrzování prepregu	35
i)	Metoda RFI	36
j)	Ostatní infuzní metody.....	37
4.5	Zpracování vláknových kompozitů.....	38
a)	Delaminace	39
b)	Metody zpracování vláknových kompozitů s polymerní matricí	41
c)	Obrábění vrstvených materiálu	45
4.6	Obrábění titanu.....	49
a)	Trochoidní frézování.....	49
4.7	Využití kompozitů na Boeingu 787 Dreamliner	50
4.8	Inteligentní materiály	53
4.9	Technologie elektropohonu.....	54
a)	Systém WheelTug.....	54
b)	Konstrukce systému WheelTug	54
c)	Hlavní výhody WheelTug.....	56
4.10	Použití biopaliv.....	57
5.	Zhodnocení a komentář k použitelným novým technologiím.....	59
6.	Závěr a splnění cíle práce.....	60
	Použitá literatura	61

Seznam zkratek

Zkratka	Český název	Anglický název
AFRP	Kompozit s aramidovými vlákny	Aramid Fiber-Reinforced Plastic
APU	Pomocná energetická jednotka	Auxiliary Power Unit
BtL	Biomasa ke zkapalnění	Biomass to liquid
CAM	Počítačová podpora obrábění	Computer Aided Manufacturing
CATIA	Programový systém podporující trojrozměrný interaktivní návrh	Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application
CFRP	Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny	Glass Fibre-Reinforced Plastics
CMC	Kompozity s keramickou maticí	Ceramic Matrix Composite
CNC	Číslicové řízení počítačem	Computer Numeric Control
CNT	Uhlíkové nanotrubičky	Carbon nanotubes
ELM	Elektrické zátěžové měření	Electrical Load Measurement
FAA	Federální letecký úřad	Federal Aviation Administration
GFRP	Plasty vyztužené skelnými vlákny	Glass Fibre-Reinforced Plastics
GLARE	Hliníkový laminát vyztužený skelnými vlákny	Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy
GPS	Globální polohový systém	Global Positioning System
HSC	Vysokorychlostní řezání	High Speed Cutting
HSM	Vysokorychlostní obrábění	High Speed Machining
HVC	Obrábění s velkými objemy úběru	High Volume Cutting
MEL	Seznam minimálního vybavení	Minimum Equipment List
Metoda RFI	Infuze filmu pryskyřice	Resin Film Infusion
Metoda RTM	Injektážní technologie	Resin Transfer Moulding

Metoda CVD	Chemická depozice z plynné fáze	Chemical Vapour Deposition
Metoda PVD	Nanášení odpařením z pevné fáze	Physical Vapour Deposition
MMC	Kompozity s kovovou maticí	Metal Matrix Composite
PKD	Polykrystalický diamant	Polycrystalline diamond
PMC	Kompozity s polymerní maticí	Polymer Matrix Composites
Prepregy	Předimpregnovaná vlákna	Preimpregnated fibres
Pulturze	Technologie tažení	Pultrusion
RWY	Vzletová a přistávací dráha	Runway
USB	Univerzální sériová sběrnice	Universal Serial Bus
VARI	Injektáž pryskyřice s použitím vakua	Vacuum Assisted Resin Injection
Vrtáky SPF	Karbidové vrtáky do kompozitů	Split Point Fiber drills

1. Úvod

V oblasti novinek směřujícím k aktuálnímu vývoji budoucích technologií v letecké výrobě jsou renomovaní výrobci letadel poměrně skoupí na zveřejnění úspěchů dosažených při vlastním výzkumu. V práci budou uvedeny některé z připravovaných novinek pro oblast leteckého provozu. Cílem práce je pak „zhodnotit uvedené technologie s ohledem na jejich možné použití při výrobě letadel nebo pro zvýšení úrovně leteckého provozu“.

2. Analýza způsobu výroby letadel

2.1 Rozdělení letadel

Text v této kapitole vychází z literatury [1]

Podle počtu motorů

- Od jednomotorových až po šestimotorová (např.: Antonow An-225 Mrija)

Podle typu motorů

- Letadla s pístovými motory (vrtulová)
- Turbouvrtulová letadla
- Letadla s proudovými motory

Podle kapacity (velikosti)

- aerotaxi: 3 až 10 cestujících
- malá dopravní letadla: 10 až 30 cestujících
- střední dopravní letadla: 30 až 100 cestujících
- velká dopravní letadla: 100 až 200 cestujících
- velkokapacitní aerobusy: nad 200 cestujících

Podle délky doletu

- letadla na krátké (regionální) tratě mají dolet do 1000km
- letadla na střední tratě mají dolet od 1000 do 3000km
- letadla na dlouhé tratě mají dolet nad 3000km

Podle polohy vodorovných ocasních ploch

- klasické uspořádání - křídlo vpředu, vodorovná ocasní plocha vzadu
- uspořádání typu kachna - vodorovné ocasní plochy jsou umístěny před křídlem na přídí letounu
- uspořádání typu triplane – kombinace klasického a „kachního“ uspořádání. Vodorovné ocasní plochy jsou umístěny jak na přídí tak i za křídlem

- **uspořádání typu tandem** – vodorovné ocasní plochy ve velikosti dalšího křídla (poměr obou křídel 5:4 nebo 5:3) z důvodu zvětšení vztlaku a jeho rozdělení mezi oběma plochami čímž se měl zvýšit rozsah centráže. Tato koncepce je však nejméně osvědčená
- **bezocasá letadla** – odstraněním ocasních ploch se výrazně snížil nežádoucí odpor a také celková hmotnost letadla jelikož trup způsobuje 30 až 40% celkového odporu a 8 až 14% jeho vzletové hmotnosti. K získání podélné stability se na konci samokřídel umísťují vyvažovací plochy podobné křidélkům. Tím dosáhneme větších výkonů, ale na úkor letových vlastností a náročnosti pilotáže.

Další dělení:

- **podle půdorysného tvaru křídel** (obdélníková, lichoběžníková, eliptická, šípovitá-používají se pro nadzvukové rychlosti)
- **typu podvozků** (s ostruhovým podvozkem, příďovým, tandemovým)
- **polohy nosných ploch** (hornoplošníky, středoplošníky a dolnoplošníky)

2.2 Strategie návrhu výroby letadla

Text v této kapitole vychází z literatury [2]

Výroba letadel neprobíhá jako například u automobilů na páse, ale každé letadlo je konstruováno jednotlivě. Jednak z důvodu rozměrů a taky pro to, že počet ročně prodaných kusů je výrazně menší. Stěží bychom našli dva úplně stejná letadla, dá se říct, že každé je unikátní. U velkých leteckých výrobců se jednotlivé díly (např. trup, nosné plochy, přistávací zařízení a pohonné jednotky) se produkují na různých částech světa a pak za pomoci vodní, pozemní nebo letecké dopravy jsou převezeny do montážní haly, kde se kompletují. Největší světový výrobce dopravních letadel Airbus má 4 hlavní montážní linky. Dvě ve Francii ve městě Toulouse, jednu v Hamburku (Německo) a čtvrtou v Seville (Španělsko). Jeho americký konkurent Boeing má hlavní montážní linky ve státě Washington a to Seattle-Everett (budova s největším objemem na světě) a Seattle-Renton

Samotná výroba od prvního nápadu až po hotové letadlo často trvá i víc jak 10 let. Nejdříve se tým odborníků snaží odhadnout jaký typ letadla a v jakém počtu bude požadován v budoucnu (10 až 30 let). Provádí výzkum u leteckých společností, o jaké letadlo by měly zájem. Hlavními kritérii jsou dolet, počet sedadel, spotřeba paliva, bezpečnost a samozřejmě cena.

V další fázi vytvoří inženýři na počítačích model letadla. Tato část zahrnuje stovky lidí z různých oborů letecké techniky. Aerodynamici navrhnu tvar letadla tak aby celá konstrukce měla co nejmenší odpor a tím pádem i menší spotřebu paliva. Stroj přitom musí mít dostatek místa pro cestující i náklad a splňovat kritéria dohodnutá s leteckými společnostmi. Statici pak mají za úkol postavit letadlo tak aby bylo co nejbezpečnější, to znamená postavit ho tak aby bylo pevné a vydrželo extrémní zatížení například při turbulencích, bouři nebo tvrdém přistání. Avionici vybírají ty nejvhodnější systémy pro daný typ letadla. Oddělení mají navzájem propojené počítače a tak se jakákoliv změna na modelu ukáže všem. Statikům se tak například ihned projeví na čem právě pracují kolegové v oblasti aerodynamiky a jaký vliv to má na jejich práci. Kdysi, když systémy nebyly takto propojeny se stávalo, že některé součásti do sebe nezapadaly a musely se pak upravovat přímo při sestavování prototypu. Jedním z nepoužívanějších softwaru je **CATIA** (Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application). Je to počítačový program, využívaný hlavně k projektování letadel, který značně usnadňuje pracovní postup a umožňuje například vnášet dodatečné změny v projektu bez oprav desítek výkresu, jak to bylo dřív. Jednotlivá data a rozměry dané součásti se posílají z počítače přímo do výrobní linky, která je taky řízená počítačem. Tím se dosáhne naprosté přesnosti při koncovém sestavování jednotlivých součástí. Využívají ho nejen letečtí výrobci jako je Airbus a Boeing ale také automobilky (BMW, Audi, Porsche, ...). Když je letadlo hotové je třeba jej ještě před nástřikem a předáním klientovi otestovat za letu. Testovací pilot vyzkouší všechny systémy a letové vlastnosti letadla. Pokud je vše v pořádku je letadlo převezeno do lakovny kde dostane finální barvy podle požadavků zákazníka a následně předáno ke konečným úpravám interiéru a letadlo je hotové.

2.3 Požadavky na konstrukci letadla

Text v této kapitole vychází z literatury [1]

a) Pevnost

Základní požadavky na pevnost konstrukce jsou dány národními a mezinárodními předpisy letové způsobilosti. Konstrukce musí přenášet všechna zatížení, které se během běžného provozu mohou vyskytnout, aniž by se porušila nebo došlo k nepřijatelným deformacím.

b) Tuhost

Tuhost konstrukce je spojena s aeroelastickými jevy jako je flutter, torzní divergence nebo reverze řízení. Málo tuhé konstrukce se mohou nebezpečně rozkmitat (futter) nebo může dojít k velkým deformacím (divergence). Oba tyto jevy znamenají celkovou destruktci letounu. K reverzi řízení dochází především na křídle a znamená snížení účinnosti řízení, resp. opačné působení řídicích orgánů následkem nedostatečné tuhosti konstrukce.

c) Spolehlivost

Spolehlivost všech nosných prvků a bezpohybové funkce pohonné jednotky, výstroje a ostatních systému na letadle. V tabulce jsou uvedeny požadované hodnoty spolehlivosti v závislosti na typech poruchy pro uznání letové způsobilosti

Tabulka I: Hodnoty spolehlivosti v závislosti na typech poruchy

Pravděpodobnost poruchy	Číselně	Následky
Častá	$>10^{-3}$	Bez důsledku na letovou způsobilost
Dosti pravděpodobná	$10^{-3} - 10^{-5}$	Nevýznamné
Nepravděpodobná	$10^{-5} - 10^{-7}$	Významné
Velmi nepravděpodobná	$<10^{-7}$	Nebezpečné (havarijní)
Extrémně nepravděpodobná	$<10^{-9}$	Katastrofické

d) Minimální hmotnost

U prvních letadel minimální hmotnost byla podmínkou, aby letadlo bylo vůbec schopné vzlétnout. V současnosti díky vysokým výkonům pohonných jednotek se tento požadavek spojuje spíše s hospodárností provozu letadla. Nízká hmotnost konstrukce znamená možnost zvětšení užitečného zatížení a tím snížení ekonomických nákladů na přepravu jednotkového množství nákladu nebo osob. Lehčí konstrukce si vystačí s menším výkonem pohonných jednotek, čím se dosáhne úspory paliva.

e) Plné využití materiálu

Spjaté s požadavkem na minimální hmotnost konstrukce. Snaha vyrobit konstrukci, která bude co nejlehčí a bude přenášet požadované zatížení při použití materiálu s vysokou pevností a malou hmotností. Díky tomuto požadavku se začaly rozvíjet výpočtové metody pro stanovení zatížení a vnitřní napjatosti konstrukce a také došlo k rozšíření pevnostních zkoušek

f) Technologické požadavky

Jsou spjaté s výrobními a provozními technologickými požadavky. Výrobní technologie řeší otázku proveditelnosti výroby s ohledem na dané výrobní prostředky a postupy. Provozní technologie zas provoz letadla s minimálními nároky na údržbu a ošetřování letounu

g) Aerodynamická čistota

Konstrukce letadla musí mít co nejmenší aerodynamický odpor, protože ten pak limituje parametry jako je rychlost nebo dolet a tím i ekonomiku provozu letadla

Uvedené požadavky na konstrukci letadla si můžou být často protichůdné. Při návrhu letadla jde právě o to sladit všechny požadavky tak, aby letadlo bylo schopno plnit požadované úlohy a bylo na úrovni doby po technického i provozního hlediska.

3. Technologie ve výrobě moderních letadel

3.1 Obecná klasifikace materiálů na letadla

Text v této kapitole vychází z literatury [1]

Letecký materiál by měl mít co nejnižší hmotnost a co nejvyšší pevnost. První materiál použitý při výrobě letadla bylo dřevo, později se používaly kombinované konstrukce ze dřeva a ocelových trubek. S vývojem tenkostěnných konstrukcí přišly na řadu slitiny hořčíků a hliníku, které se používají i u dnešních konstrukcí. Pro nadzvukové rychlosti a vysoká namáhání se využívá titan a speciální ocele z důvodu vysokého aerodynamického ohřevu.

V poslední době dochází k velkému uplatnění kompozitních materiálu, jako jsou lamináty, především ve sportovním letectví, například pro ultralehká letadla nebo kluzáky, ale také u velkých dopravních letadel (Boeing 787 Dreamliner)

h) Slitiny hliníku

Především **dural** (hliník + měď + hořčík) a **pantal** (hliník + hořčík + křemík). Nejpoužívanější materiál pro stavbu letadel hlavně pro tenkostěnné konstrukce. Oproti ocelovým konstrukcím můžeme dosáhnout větší tloušťky stěn při stejné váze a tím i větší odolnosti proti deformacím.

Hlavní výhodou je tedy jejich nízká hmotnost a vysoká pevnost. Nevýhodou je sklon ke korozi. Té však lze zabránit elektrolytickou oxidací povrchu nebo plátami tenké folie čistého hliníku. S těchto slitin se především vyrábí potah, přepážky, podélné výtuhy, žebra, nosníky a jiné části draku.

Jako jeden z materiálu budoucnosti se jeví nové, perspektivní **slitiny Al – Li**. Tyto slitiny hliníku s lithiem se vyznačují přibližně o 10% nižší hmotností a o 15% vyšší tuhostí ve srovnání s duralem. Praktické využití tohoto materiálu je zatím omezené především z důvodu menší odolnosti vůči únavovému porušení, šíření trhlin a vysoké ceně. Nový zájem o tyto Al – Li slitiny přišel s prudkým nárůstem aplikací kompozitních materiálu.

i) Slitiny hořčíku

Mají podobné vlastnosti jako slitiny hliníku, ale lepší odolnost vůči korozi. Jsou to hlavně slitiny s hliníkem, zinkem a manganem

j) Oceli

Jsou používané na nejvíc namáhané části jako podvozek, čepy, závěsná kování, šrouby nebo pro zesílení žeber, přepážek a pásnic. Výhodou oceli jejich větší pevnost a teplotní odolnost, ale mají vyšší hustotu čili i hmotnost.

k) Slitiny titanu

Titan a jeho slitiny se v leteckém průmyslu objevují kolem roku 1980. Krátce po tom, co se začaly používat na vojenských letadlech. Tyto slitiny našly své uplatnění hlavně u nadzvukových letadel. Mají větší hmotnost, která je však menší než u oceli, a vysokou odolnost vůči korozi. Nové titanové slitiny se začínají používat i pro výrobu částí letadel jako jsou díly trupu, části výsuvu podvozku, prvky hydraulických systémů a podobně. Titan a jeho slitiny jsou v leteckém průmyslu důležité zejména díky specifickým vlastnostem jako jsou:

- vysoká pevnost v poměru k měrné hmotnosti
- chemická odolnost
- odolnost vůči korozi
- malá tepelná roztažnost

l) Kompozitní materiály

Obrovskou výhodou těchto materiálů je jejich vysoká pevnost a malá hmotnost. Tvoří je kombinace dvou nebo více materiálů, spojují nejlepší vlastnosti daných materiálů. Základem je organická, kovová nebo keramická matrice, která je zpevněná vlákny nebo rozptýlenými částicemi. Jsou to anizotropní látky (jejich vlastnosti jsou závislé na směru vrstvení). Největší pevnost vykazují ve směru vláken. Nejvíce se používají kompozity s organickou maticí a skelnými nebo uhlíkovými vlákny. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena a také neznalost vlivu dlouhodobého působení slunečního záření a povětrnostních podmínek na změnu mechanických vlastností. Kompozitním materiálům se ještě budu věnovat blíže v následující kapitole.

3.2 Vysokorychlostní obrábění

Text v této kapitole vychází z literatury [3]

Vysokorychlostní obrábění HSM se od klasického obrábění liší především v obráběcích rychlostech, které jsou 5 až 10 násobné. K těmto metodám patří také vysokorychlostní řezání HSC (High Speed Cutting) a obrábění s velkými objemy úběru HVC (High Volume Cutting). V kombinaci s vhodnými nástroji lze vysokorychlostním obráběním dosáhnout významného snížení výrobních časů, nákladů a síly řezání. Další předností je lepší odvod třísek. Díky vysokým obráběcím rychlostem se teplota třísky při samotném procesu blíží tavné teplotě obráběného materiálu, což vede k jejímu změknutí a tím celkový řezný odpor klesne. Zvýší se také rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny, čím se minimalizuje převod tepla do obrobku i nástroje a zvýší se přesnost celého procesu. Hlavními výhodami HMS tedy jsou:

- zkrácení výrobních časů
- úbytek síly řezání
- lepší odvod tepla při obráběcím procesu
- vyšší kvalita povrchu
- lepší rozměrová přesnost

V leteckém průmyslu se technologie HSM používá pro obrábění konstrukčních dílů křídel, trupu letadel a dalších tenkostěnných a rozměrných dílů z hliníku. Umožňuje výrobu složitých a rozměrných součástí z jednoho celku.

4. Nové směry vývoje letadel

4.1 Kompozitní materiály

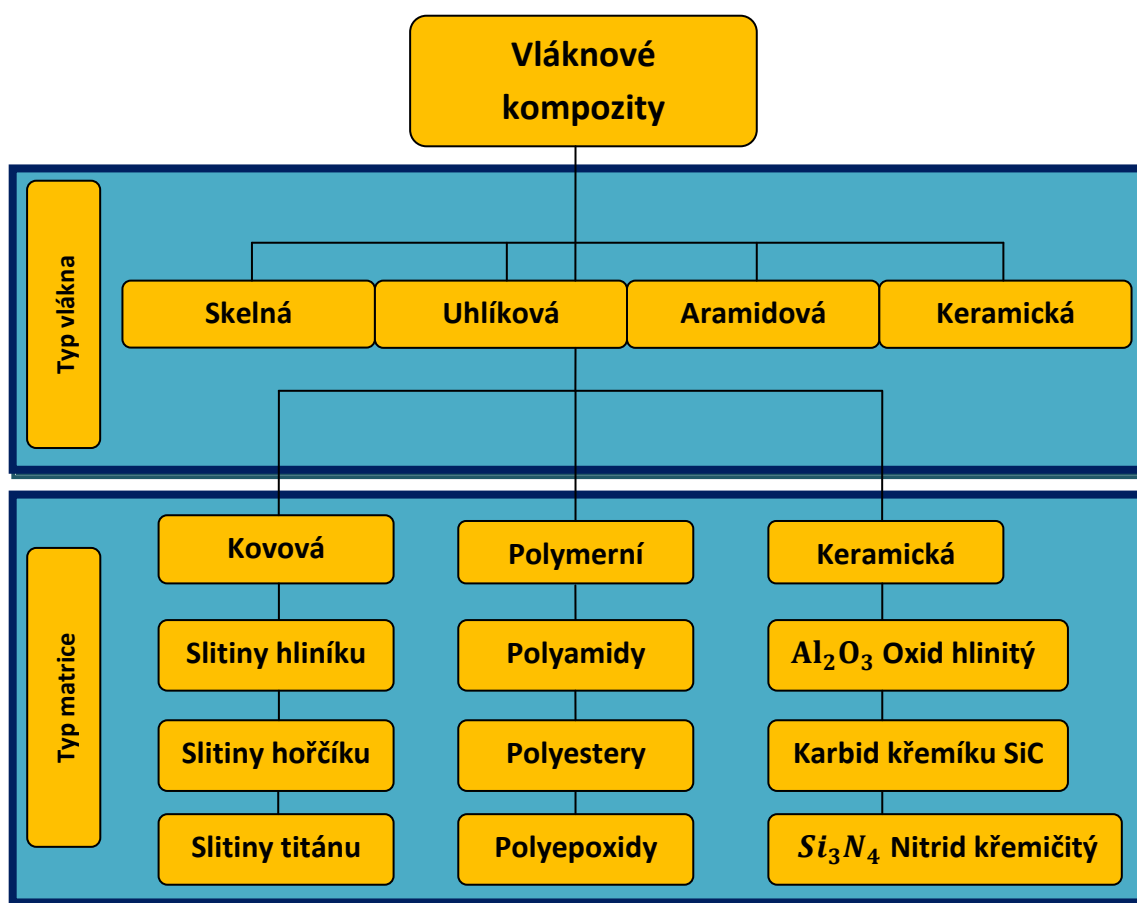
Text v této kapitole vychází z literatury [10]

Kompozitní materiál se skládá ze dvou nebo více složek o různých vlastnostech. Jedním z komponentů je matrice (matrix), která spojuje kompozit v jeden celek, určuje jeho tvrdost, pružnost a odolnost proti tlaku. Druhou složkou je konstrukční materiál - výztuž, která kompozit zpevňuje zformováním jeho dalších vlastností. Vlastnosti kompozitu nikdy nepředstavují součet nebo průměr hodnot jednotlivých vlastností jeho složek. Obecně funkce osnova spočívá v ochraně zpevňujícího materiálu, přenesení na něj vnějších pnutí a vytvoření požadovaného tvaru vyrobené kompozitní části, zatímco funkci výztuže je zajistit vysoké mechanické vlastnosti a zpevnění matrice ve vybraných směrech. Kompozitní materiály jsou stále populárnější hlavně z důvodu jejich příznivých vlastností ve srovnání s kovy takých jak pevnost a tuhost při nízké hustotě. Nabízejí také zajímavé aplikační možnosti pro nové, lehké konstrukční výrobky. Vlastnosti kompozitu záleží na fyzických vlastnostech matrice a zpevňujícího materiálu, formy výztuže (vlákna nebo částice) a poměrného množství matrice (V_m) a výztuže (V_v), které tvoří objemový podíl ($V_m + V_v = 100\%$). U vláknových kompozitů se aplikují polymerní, kovové a keramické výztuže a jako materiál se používají hlavně uhlíkové, skleněné, amidové a také v menší míře keramické, borové, grafitové a jiné, přičemž vlákna mohou být dlouhá (kontinuální) nebo krátká (diskontinuální) jakož i strukturovaná nebo náhodná. Hlavními přednostmi s polymerní matricí a dlouhými vlákny oproti krátkým vláknům jsou:

- lepší mechanické vlastnosti
- vyšší houževnatost
- menší sklon k tečení (creep)
- velmi dobrá stabilita při vyšších teplotách a vlhkém, horkém prostředí

Vlastnosti kompozitu s dlouhými a uspořádanými vlákny jsou jednoznačně anizotropní. Dlouhá vlákna mohou být uspořádány v jednom směru (všechny vlákna jsou vzájemně rovnoběžná) nebo spleteny do textilní formy (technologie „preforming“). Jednosměrné uspořádání vláken zajišťuje kompozitu nejvyšší mechanické vlastnosti.

4.2 Rozdělení vláknových kompozitů



Obrázek 1: Rozdělení vláknových kompozitů [10]

a) Kompozity s polymerní matricí (PMC)

Kompozity s polymerní matricí PMC (Polymer Matrix Composites) mohou být zpevněny hrubými a silnými vlákny rozmístěnými v měkkou a tvárnou matricí. Matrici můžou tvořit rekloplasty (polyester, epoxid) nebo termoplasty (polyamidy, polykarbonáty). Nejvíce používanými typy výztuží jsou skleněné vlákna – G (Glass), uhlíková – C (Carbon) a aramidová – A (Aramid). Proto jsou taky kompozity PMC se skleněnými vlákny označovány GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastics) a analogicky s uhlíkovými vlákny CFRP nebo aramidovými jako AFRP.

GFRP kompozity byly dlouhou dobu nejčastěji používané kvůli dobrým mechanickým vlastnostem a taky relativně nízké ceně. Na druhou stranu kompozity CFRP a AFRP poskytují větší odolnost, větší tuhost a mají nižší měrnou hmotnost (hustotu), jsou však dražší a z toho důvodu se používají pro takové části konstrukcí, kde není důležitým faktorem jejich cena ale prezentované vlastnosti. CFRP nachazejí uplatnění v konstrukcích vyžadujících vysokou tuhost a odolnost proti vyšším teplotám, zatímco AFRP mají přednost tam, kde je nejvíce důležitá odolnost, houževnatost a lehkost. Z rekroplastů se používají hlavně epoxidové pryskyřice (epoxy resins), polyesterové pryskyřice (polyester resins) i přes to že jsou levnější, vykazují nižší pevnost a větší smrštění po vytvrdnutí a tím pádem nezaručují geometrickou přesnost výrobku s matricí z epoxidové pryskyřice. Termoplasty charakterizuje nižší pevnost a nižší modul pružnosti, ale za to velmi dobrá plastičnost. Maximální pracovní teplota vláknových kompozitů není relativně moc vysoká, jelikož matrice má tendenci ke změkčení a chemickému rozkladu nebo degradaci při vyšších teplotách

b) Kompozity s kovovou maticí (MMC)

Kompozity s kovovou maticí MMC (Metal Matrix Composites) mají uplatnění v konstrukcích pracujících při relativně vyšších teplotách než jsou povoleny u PMC. Dlouhé (spojité) vlákna zaručují nejvyšší tuhost a pevnost materiálům MMC.

Struktura prvních používaných kovových kompozitů borovo-hliníkových spočívá v tom, že vrstvy vláken boru, umístěny mezi tenké, hliníkové folie, jsou tepelně spojeny folií, která podléhá deformaci kolem vláken pod vlivem tlakové síly. Díky výztuži borovými vlákny, pevnost v tahu MMC může být 3 až 5 násobně.

Jiné vyztužující materiály MMC jsou: karbid křemíku (SiC), oxid hlinitý (Al_2O_3), grafit a wolfram v podobě částic nebo krátkých a dlouhých vláken. K nejčastším maticím používaným v MMC patří slitiny hliníku, hořčíku nebo titanu.

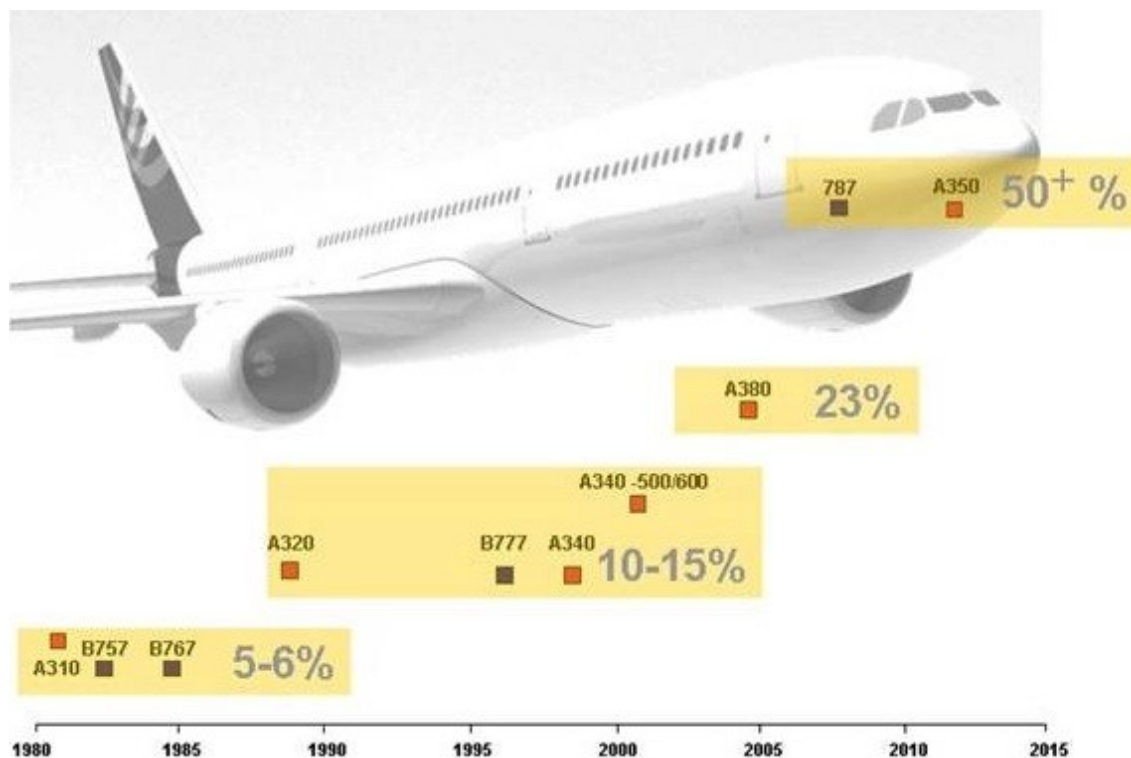
Kompozity MMC se obecně vyznačují větší pevností a vyšším modulem pružnosti v porovnání s běžnou ocelí nebo slitinami hliníku, hořčíku a titanu, jak rovněž s kompozity PMC. Nespojité, krátká vlákna a zpevňující částice MMC mají vliv na nižší cenu a zároveň na lepší rozměrovou stabilitu než jednotlivé materiály výztuže. Dokonce i malá příměs vyztužujícího materiálu (kolem 20%) způsobuje výrazné navýšení pevnosti a tuhosti MMC.

c) Kompozity s keramickou maticí (CMC)

Kompozity s keramickou maticí CMC (Ceramic Matrix Composites) jsou vytvářeny a rozvíjeny za účelem zvětšení odolnosti proti lomové houževnatosti nepevných keramických materiálů, vykazujících vyšší modul pružnosti a vyšší mechanické vlastnosti při vysokých teplotách než materiály kovové. Dlouhé vlákna a krátké (wiskery) nebo částice jsou používány jako zpevňující materiál pro CMC. Jako nejobvyklejší výztuže třeba zmínit Al_2O_3 , SiC i C, zatímco pro matrice se používá hlavně Al_2O_3 , SiC i Si_3N_4 .

4.3 Aplikace vláknových kompozitů

Vláknové kompozity mají uplatnění především v leteckém průmyslu a kosmonautice a rovněž v motorovém průmyslu, při stavbě lodí, jachet a člunů, nádrží a tlakových nádob, větrných energetických zařízení, satelitních antén, sportovního vybavení, zdravotnického vybavení nebo stavebních prvků, atd.

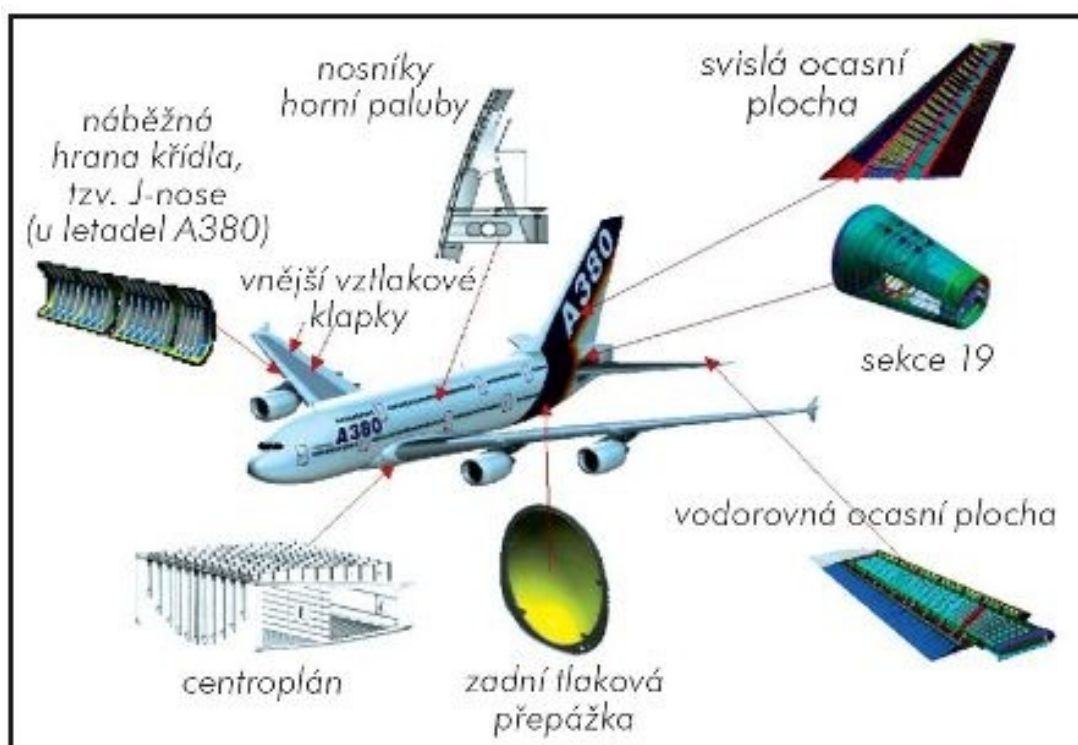


Obrázek 2: Nárůst aplikací kompozitních materiálů v leteckém průmyslu
[<http://www.sec.gov>]

Největší uplatnění se však týká leteckého průmyslu a kosmonautiky. Čím dál tím větší složitost letadel jak vojenských tak i civilních nutí jejich výrobce hledat inovativní materiály, které snižují celkovou hmotnost, maximalizují efektivní spotřebu paliva a udržují aerodynamické vyvážení (Obrázek 2). Kompozity a sestavy složené z lehkých konstrukčních materiálů jsou dobrým řešením, zvláště pro trvalejší materiály potřebné při stavbě letadel, protože jsou lehčí než doposud používané, relativně snadné k produkci a jsou odolné vůči vyšším teplotám, i když je potřeba vyřešit ještě mnoho problému s jejich tvarováním.

Dobrým příkladem významného snížení nežádoucí zátěže je zavedení firmou Airbus velkého počtu kompozitních dílů do letadla A380 (Obrázek 3). Kolem 22% základní struktury letadla (ve váhovém poměru) bylo vytvořeno z různých vláknových kompozitů s matricí z epoxidové pryskyřice, převážně CFRP. Důvodem jejich použití byla vysoká tuhost výstužných uhlíkových vláken s hodnotami až 935 GPa ve srovnání se 70 GPa, které má hliník. Hustota CFRP je jen 60% v poměru k hustotě hliníku což umožňuje snížení hmotnosti až o 40% ve srovnání s hliníkovými konstrukcemi. Společnost mezi jinými také používá v neznámém množství kompozity GFRP k výrobě svislých ocasních ploch, stejně tak FRP vyztužené křemíkem k produkci předového kuželu. 3% ze základní struktury letadla je skořepina trupu z kompozitů GLARE (Glass Fibre Reinforced Aluminium Laminates) společnosti Akzo. Je to hybridní řešení skládající se ze dvou až 6 hliníkových vrstev o tloušťce 0,2 až 0,5 mm. Mezi krajními vrstvami hliníku jsou střídavě umístěny vrstvy vláken a kovu. Vrstvy orientovaných skleněných vláken, tzv. prepregy, o tloušťce 0,125 až 0,5 mm jsou spojeny epoxidovou pryskyřicí a skombinovány s hliníkem. Orientace vláken zaleží od použití výrobku. Materiál GLARE je dražší než hliníkové a jiné kompozity, ale vzhledem k provedení zevnějších vrstev z hliníku může být spojený jako kovový materiál při mnohem menší hustotě. Zároveň by měl, při srovnatelné pevnosti, být lehčí a odolnější vůči korozím než hliník a méně náchylný na vytváření trhlin.

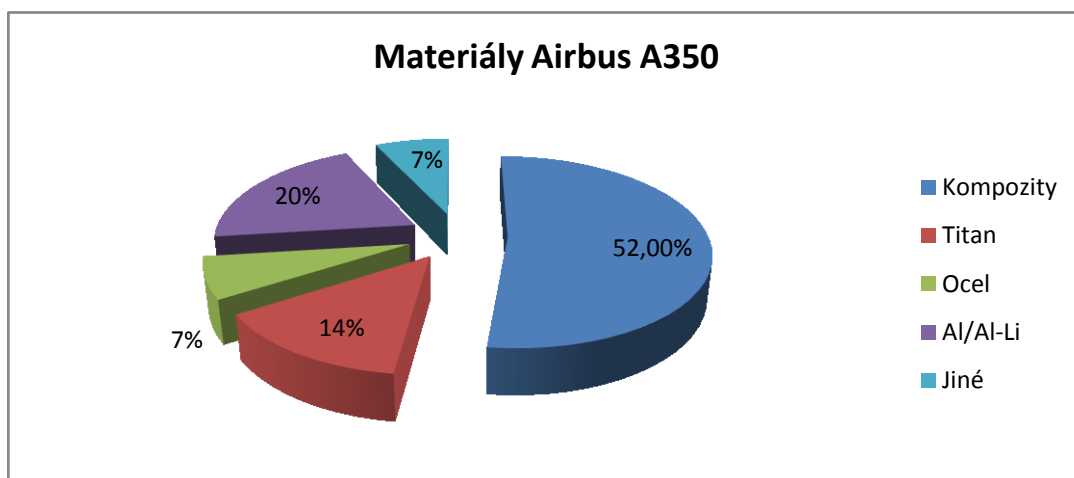
Aktuálně probíhají také výzkumné práce nad použitím **uhlíkových nanotrubelek CNT** za účelem zpevnění a posílení kompozitů. Mohou najít uplatnění do roku 2020 zároveň v letadlech A380, jak i Boeing 747.



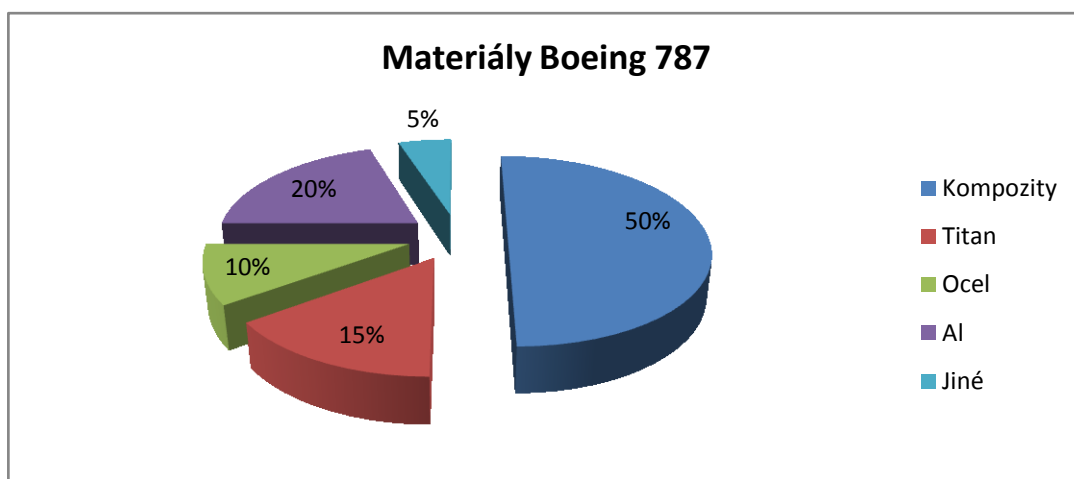
Obrázek 3: Kompozitní díly letadla Airbus A380 [<http://www.mmspektrum.com>]

Zatímco v letadle Airbus A380 podíl vláknových kompozitů činí kolem 25%, tak již v Boeingu 787 Dreamliner je tento podíl 50%. Předpokládá se, že v projektovaném širokotrupém letadle střední velikosti Airbus A350, celkový podíl lehkých konstrukčních materiálu jako jsou titan, hliník a kompozity, bude 86%. Na příkladu letadla Airbus A350 (Obrázek 4) a zvláště letadel série C společnosti Bombardier Aerospace Corporation, je možné sledovat rostoucí použití prvků hliníkovo-lithiových (Al-Li), vyznačujících se nejenom možností snížení hmotnosti letadla o 5% ve srovnání se samotným hliníkem, ale rovněž výhodami jako celková odolnost vůči korozi a rovněž dobré spojení pevnosti a houževnatosti. Společnost Alcoa (název firmy vznikl spojením prvních písmen **A**luminum **C**ompany of **A**merica), třetí největší producent hliníku (hned po Rio Tinto Alcan a Rusal) a jeden z dodavatelů pro firmu Boeing, pracuje na vývoji nové technologie vytlačování hliníkových plechů. Je známo, že slitiny hliníku s lithiem mají lepší koeficienty, které umožňují snížit hmotnost letadla.

Srovnání použitých materiálů na letadlech Airbus A350 a Boeing B787



Obrázek 4: Podíl lehkých materiálů na letadle Airbus A350 [<http://www.sec.gov>]



Obrázek 5: Podíl lehkých materiálů na letadle Boeing 787 [<http://www.sec.gov>]

Použití kompozitů roste rovněž i u letadel jiných výrobců. Příkladem může být třeba 8místný jet Premier 1 firmy Raytheon. Předová část trupu je vyrobena z kompozitů CFRP (Obrázek 6).



Obrázek 6: Předová část trupu letadla Premier 1 z kompozitů CFRP [10]

Kompozitní materiál nachází také uplatnění u armádních letadel. Stíhací bombardér F-35 Joint Strike Fighter společnosti Lockheed Martin Aeronautics má křídla pokryte kompozitem s uhlíkovými vlákny. Aby bylo letadlo obtížněji vykryvatelné radarem, musí mít tvar s krajně úzkou tolerancí (přesnost v řádech 0,2 mm) co vyžaduje vysoké nároky na obráběcí proces a nástroje samotné.

Intenzivní rozvoj aplikací kompozitních materiálu a také problémy spojené s jejich produkcí a zpracováním, přinutily 54 amerických společností, zabývajících se obráběním laminátu a podporovaných vládními fondy, ke spojení úsilí s cílem zkoumat pokročilé výrobní procesy. Tak v roce 2002 vznikla organizace National Center for Defense Manufacturing & Machining w Latrobe. Rovněž v Evropě 2004 vzniklo Sdružení CFK-Valley Stade e. V. (Stade, Německo), které obecně spojuje více než 70 renomovaných společností a výzkumných jednotek spojených s profilem produkčně-výzkumným s problematikou kompozitů s uhlíkovými vlákny – CFK (Carbon Faserverstärkte Kunststoffe). Hlavním odběratelem inovačních řešení z oblasti lehkých konstrukcí je sice letecká společnost Airbus, ale cílem CFK-Valley je vytvoření kompletních procesních řetězců od koncepcí konstrukcí z CFK přes jejich výrobu a zpracování až po recyklaci.

4.4 Technologie výroby kompozitních celků letadla

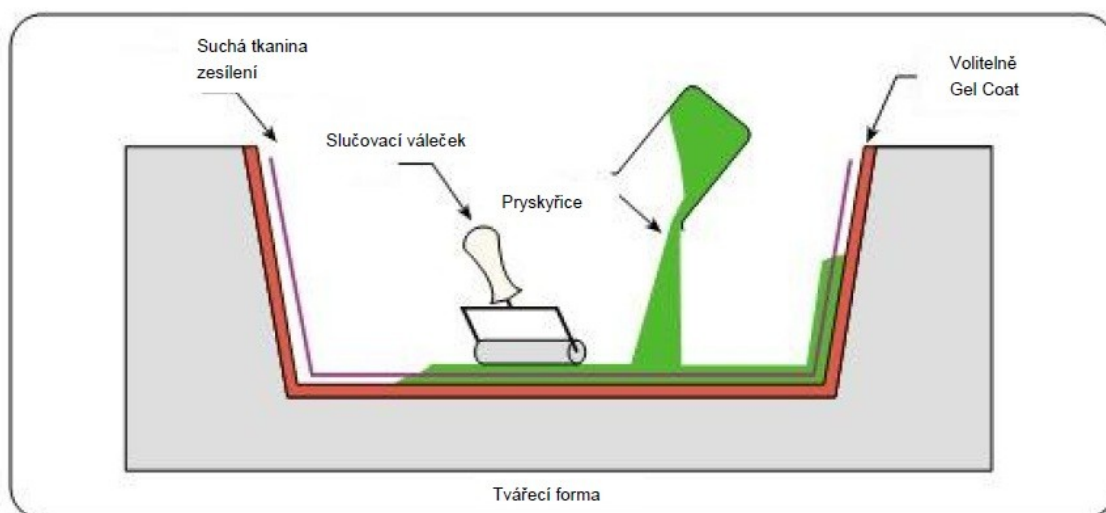
Text v této kapitole vychází z literatury [9]

Kompozity mají dnes široké zastoupení v různých oborech. Čím víc se kompozit stává populárnější, rozvíjí se i technologie jeho výroby. Hlavní kritéria pro výrobu kompozitních dílů se odvíjí od požadavků na jeho výsledné vlastnosti, jako jsou rozměry daných částí, jejich pevnost a zatížení, kterému musí být schopny odolat a počet jaký se jich vyrobí. Výběr použitých technologií také záleží na jejich nákladnosti.

a) Ruční nanášení

Tato metoda je jedna z nejstarších. Její hlavní předností je jednoduchost a malá nákladnost. Princip spočívá v tom, že vlákna pryskyřice jsou impregnována ručně a pokládána v podobě tkaných, sešívaných, pletených nebo lepených tkanin. Látka je namáčena v pryskyřici a válečkem nebo štětečkem impregnována a poté se celek vytvrdí za normálních podmínek na vzduchu.

Mezi další výhody ručního nanášení patří také nízké náklady na potřebné vybavení a široká možnost výběru materiálu. Nevýhody spočívají v tom, že kvalita výrobku závisí od zručnosti pracovníku a také že pryskyřice je škodlivá pro lidský organismus a díky její menší molekulární váze může snadněji pronikat skrze ochranné pomůcky.

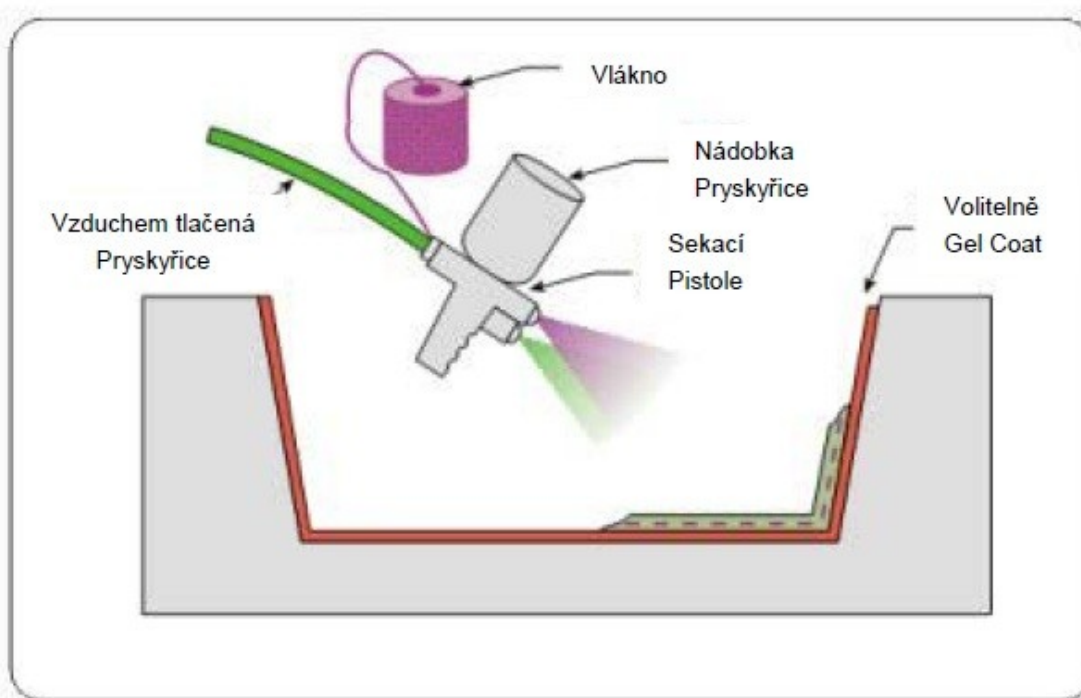


Obrázek 7: Ruční nanášení [9]

b) Nanášení stříkáním

Nanášení do formy se provádí za pomoci pistole, ve které se nachází dvě nádoby – jedna s pryskyřicí a druhá s krátkými skelnými vlákny. Celek se při nástřiku v proudu smíchá. Tvrdnutí probíhá za stejných podmínek jako u ručního nanášení.

Hlavní výhody této metody jsou podobné jako při ručním nanášení – dlouholetá ověřenost a nízké náklady na výrobu a potřebné vybavení. Dále také rychlé nanášení vláken a pryskyřice do formy. Nevýhodou je, že takto vyráběný laminát má tendenci k přesycení pryskyřicí a tím je jeho výsledná váha poměrně vysoká a díky krátkým vláknům má omezené mechanické vlastnosti

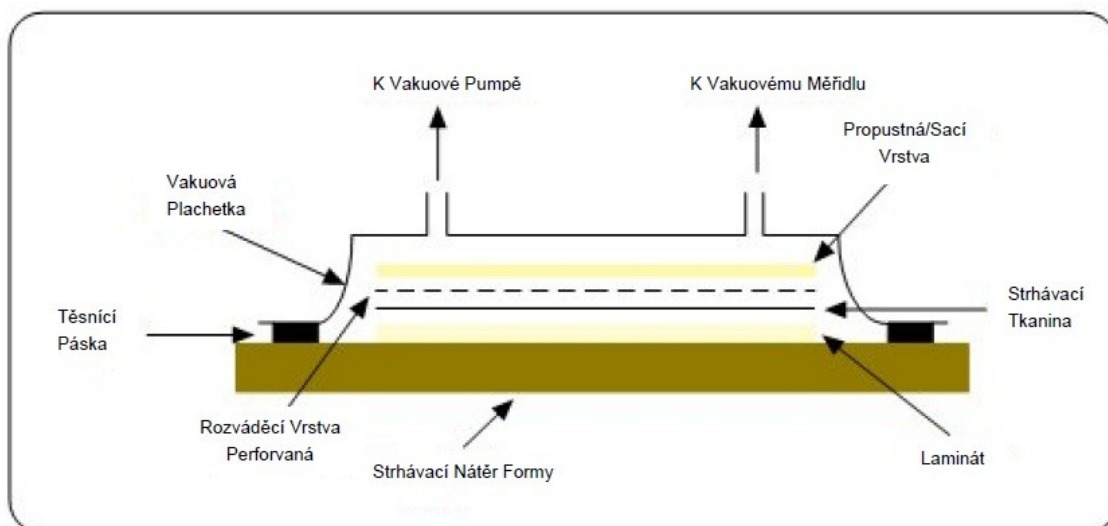


Obrázek 8: Nanášení stříkáním [9]

c) Vakuové lisování

Technologie je podobná k ručnímu nanášení jen lepšího spojení všech částic při tvrdnutí se dosáhne díky tlaku působícímu na horní část kompozitu. Dodatečného tlaku se dosáhne díky přikrytí povlakem z plastiku a utěsnění páskou. Pak se z celku vysaje vzduch vakuovou pumpou přes odsávací otvory. Tím vznikne podtlak, díky jehož síle dosáhneme lepšího zpevnění materiálu.

Výhodou vakuového lisování je především lepší prosycení pryskyřicí díky vyššímu tlaku a možnost dosáhnout většího obsahu tkanin. Tato metoda nemá vliv na zdraví pracovníku díky vakuové folii, která snižuje množství prchavých látek v průběhu vytvrzování. Nevýhodami jsou vyšší cena, náročnost a větší množství spotřebovaného materiálu

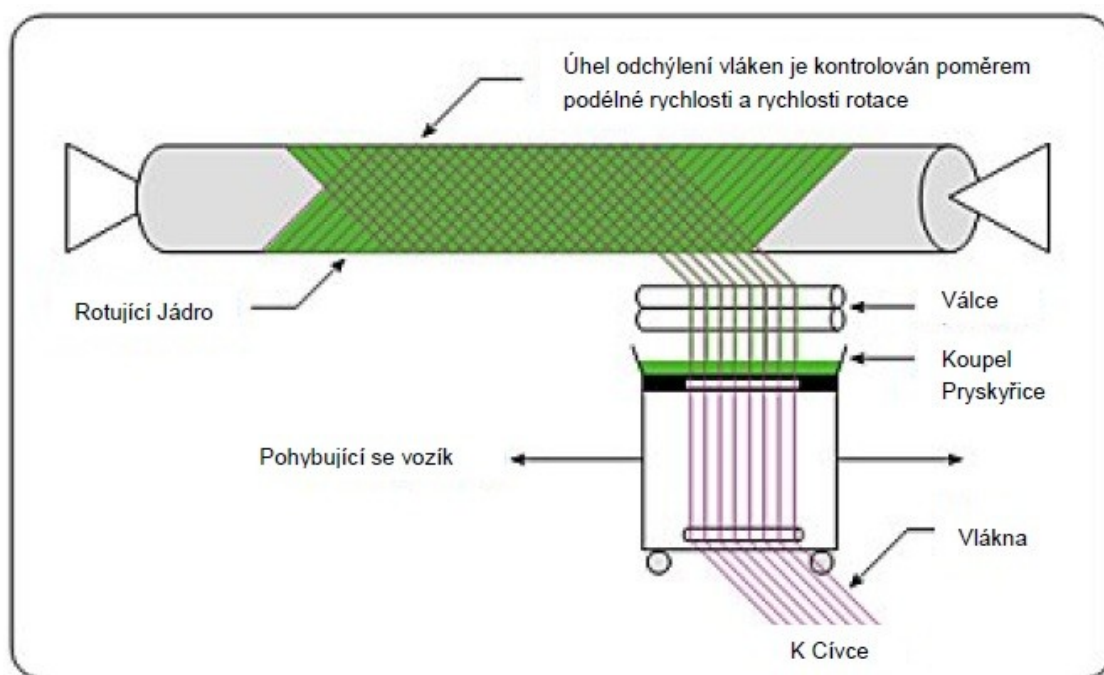


Obrázek 9: Vakuové lisování [9]

d) Navíjení vláken

Touto metodou se vyrábí hlavně duté součásti, jako jsou například nádrže nebo různého druhu potrubí. Vlákná se pomocí speciálního pohyblivého vozíku protahují přes koupel z pryskyřice a navíjí se na formu v různých směrech. Orientace vláken se řídí pomocí podávacího mechanismu a rotací formy

Hlavní výhodami jsou rychlost této metody, menší cena vláken, řízené dávkování pryskyřice pro jednotlivá vlákna díky jejich protahování přes stavitelné mezery. Dále také velmi dobré konstrukční vlastnosti výsledného výrobku jelikož vlákna se dají splétat do složitých vzorců. Nevýhody spočívají v horším pokládání vláken v podélném směru výrobku, pro větší součásti je tvorba jádra nákladnější a díky nízké viskozitě škodlivost pro zdraví pracovníků.



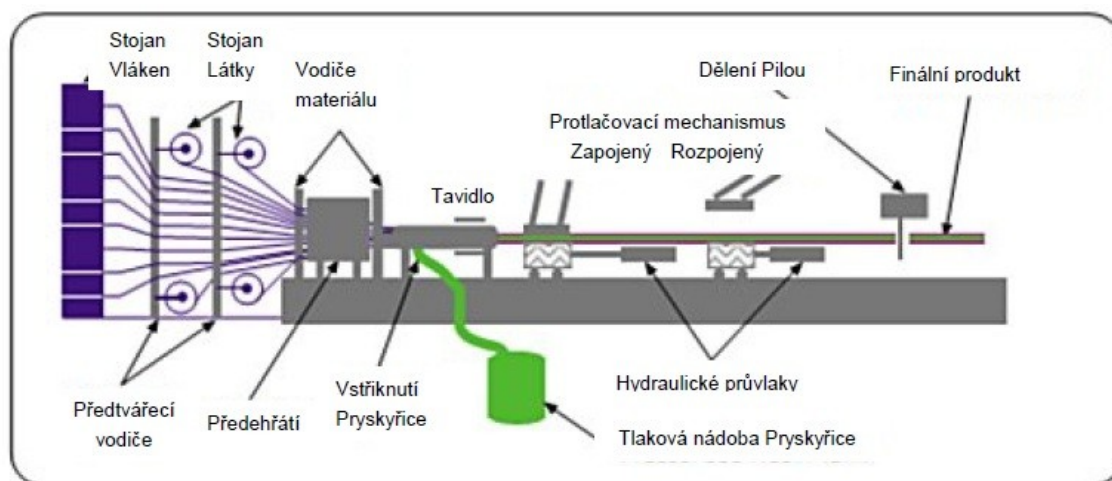
Obrázek 10: Navíjení vláken [9]

e) Pultruze

Technologie umožňující rychlejší výrobu laminátu díky nahřívání vláken pomocí průvlaků a tím rychlejší tvrdnutí. Vlákná jsou navíjena přímo s navíjecí cívky a protahována přes vanu s pryskyřicí a následně zahřátým průvlakem. Tyto průvlaky zastupují klasickou formu. Mají konečný tvar materiálu a také regulují obsah pryskyřice, dokončují nasycení vláken a vytvrzují materiál. Poté je materiál automaticky řezán na požadovanou délku. Tento proces je nepřetržitý a umožňuje výrobu laminátu o konstantním průřezu.

Jinou variantou pultruze je pulforming, který umožňuje změny v příčném průřezu při výrobě profilu. Touto metodou se vlákna táhnou průvlakem s impregnací a pak pod upínač formy pro vytvrzení. Nevýhodou je, že se celý proces stává nespojitým.

Touto metodou dosáhneme velmi rychlé výroby a také dobrých ekonomických ukazatelů díky přesně řízenému množství matrice a také přímému odebrání vláken z navíjecí cívky. Kompozity takto vyrobené se vyznačují dobrými vlastnostmi což je způsobené především vyšším obsahem vláken v materiálu. Zápornými vlastnostmi jsou poměrně vysoké náklady na ohřev průvlaků a minimální možnost změnit průřez výrobku po jeho délce.

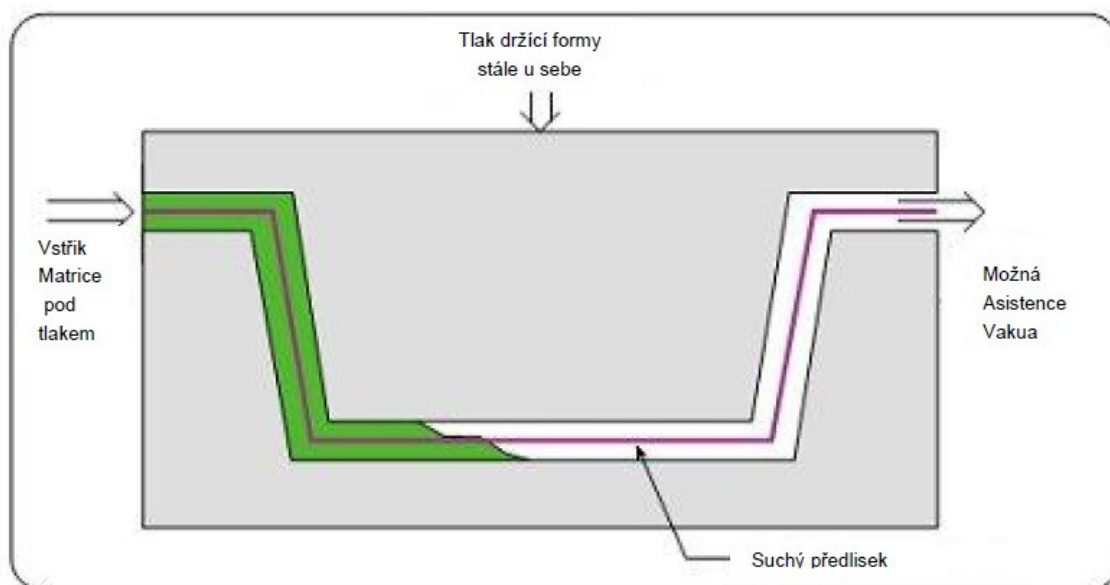


Obrázek 11: Pultruze [9]

f) Metoda RTM

Nejdříve se suchá tkanina vloží mezi horní a spodní část formy a následně je do formy pod tlakem vstřikována pryskyřice přičemž může být využito i vakuum pro lepší prosycení tkaniny (metoda s použitím vakua má název VARI – Vacuum Assisted Resin Injection). Aby tkanina lépe držela tvar a také z důvodu snadnějšího vkládání, může se před vložením lisovat do tvaru formy. Tvrdnutí probíhá buď za okolní, nebo zvýšené teploty. Tato metoda je kromě výroby leteckých součástí používá také v automobilovém průmyslu a při výrobě vlakových sedadel.

Výsledný materiál má vysoký obsah vláken a malé množství neprosycených míst. Oboustranná forma vytváří kvalitní povrch a chrání před škodlivým únikem pryskyřice čímž je šetrná ke zdraví zaměstnanců a životnímu prostředí. Nevýhodou je vysoká cena formy a přípravku, díky čemuž je technologie omezená pouze pro výrobu malých a středních dílů.

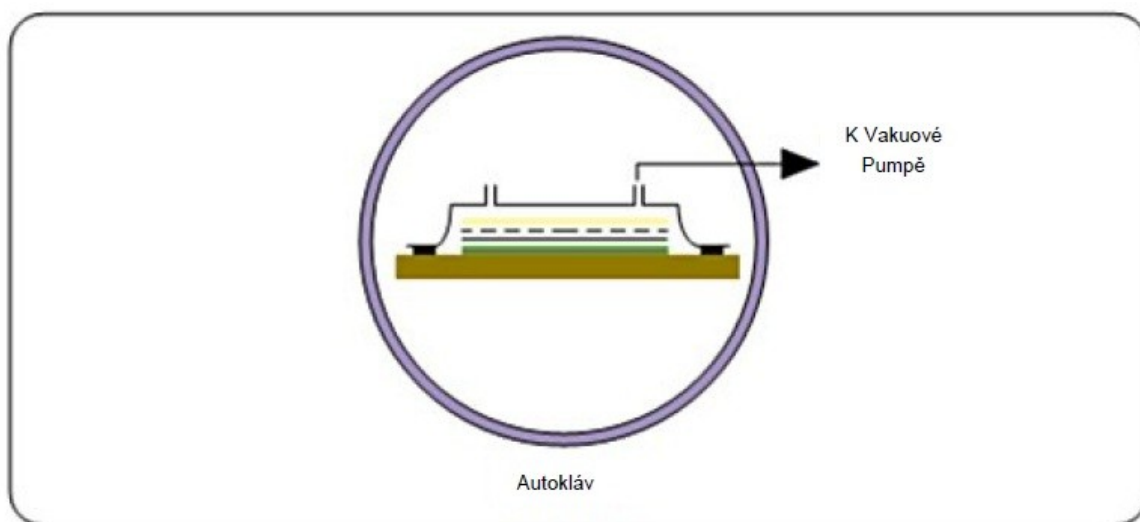


Obrázek 12: Metoda RTM [9]

g) Prepregy

Vlákna a tkanina jsou již výrobcem předimpregnována a jsou určena k rychlému využití nebo se musí skladovat v mrazácích, jinak mají životnost pouze pár týdnů nebo měsíců. Pre-impregnace se provádí vlivem tepla a tlaku anebo rozpouštědly s předkatalýzou pryskyřice. Předimpregnovaný materiál neboli prepreg je na dotek lepkavý, protože pryskyřice je při teplotách okolí v pevném stavu. Výroba dílu s prepregu vypadá tak, že se látka vloží pod vakuovou folii a zahřeje až do teploty 120-180°C díky čemuž se pryskyřice rozteče a následně opět vytvrdí. To vše se děje pod tlakem až 5 atmosfér tvořeným autoklávem. Touto metodou se vyrábí například části křídel nebo ocasních ploch.

Hlavní výhoda této metody spočívá v tom, že podíl pryskyřice ve vlákně je přesně nastaven výrobcem a tím se dosáhne vysokému podílu vláken. Materiál není tak škodlivý a cena samotných vláken je nižší. Chemické vlastnosti matrice mohou být upraveny přímo pro mechanickou a tepelnou zátěž, které bude výrobek muset odolávat. Záporymi této metody je vyšší cena samotných prepregu a nutnost využití autoklávu pro zvýšení tlaku při vytvrzování, což se také projeví v omezení velikosti výrobku a celkovým zpomalením samotné výroby.

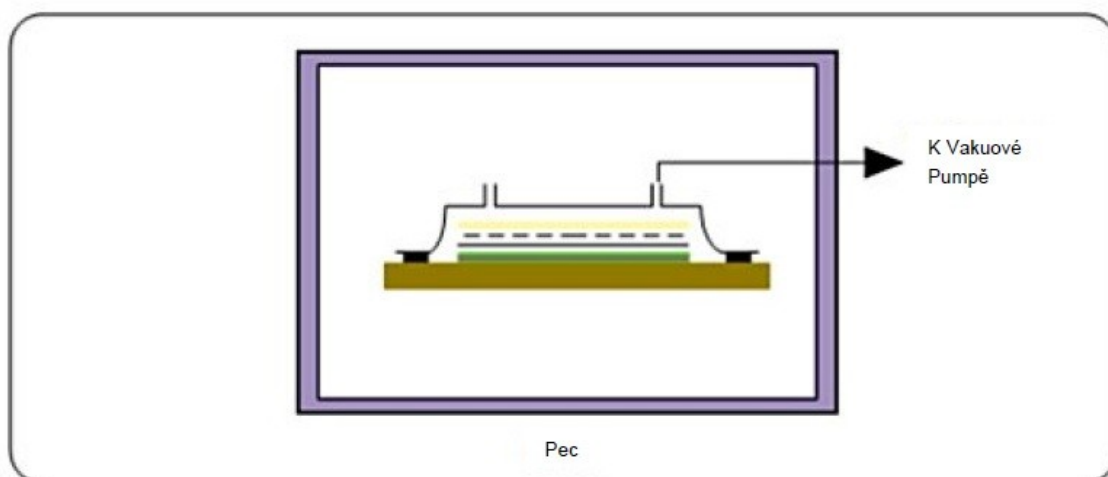


Obrázek 13: Prepregy [9]

h) Nízkoteplotní vytvrzování prepregu

Technologie se liší od klasického prepregu pouze jiným chemickým složením pryskyřice což umožňuje tvrzení při nižších teplotách okolo 60 - 100°C. Pracovní doba materiálu před vytvrzením činí týden, ale při vyšších teplotách může dosáhnout až několik měsíců. Při této metodě stačí pouze tlak tvořený samotnou vakuovou folií čímž odpadá nutnost autoklávu.

Stejně výhody jako u klasických prepregů, doplněné o levnější materiály pro výrobu formy, které lze touto metodou použít kvůli menším teplotám při vytvrzování, například dřevo. Také celkové náklady jsou menší díky nižší potřebě tepla a k ohřevu stačí jednoduché horkovzdušné pece. Nevýhody oproti jiným metodám je vyšší cena prepregu, potřeba pece a vakuové folie a náročnost na elektrickou energii potřebou pro vyhřátí pece.

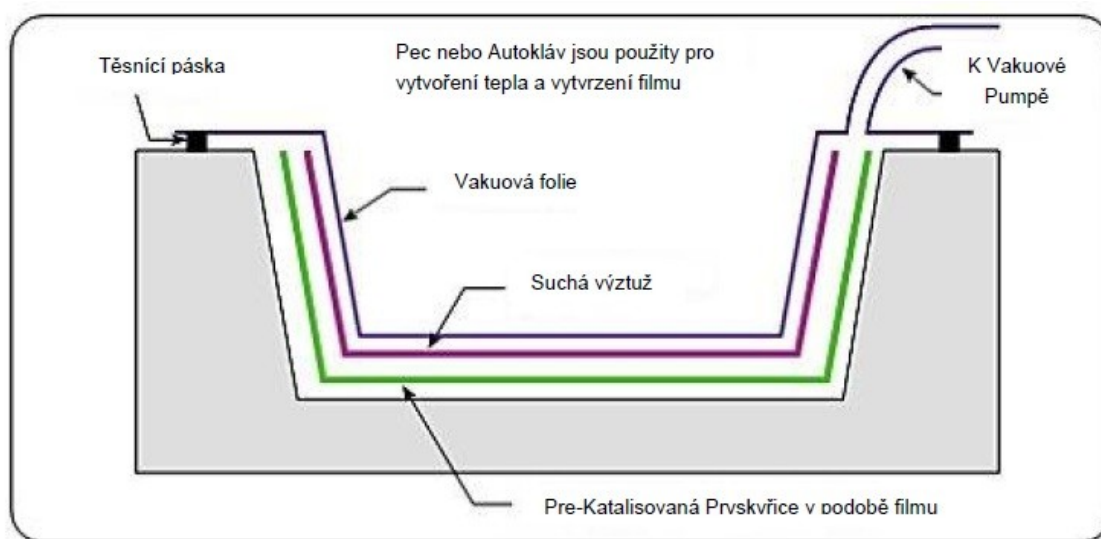


Obrázek 14: Nízkoteplotní vytvrzování prepregu [9]

i) Metoda RFI

Suchá tkanina se prokládá tenkými vrstvami pryskyřice nanesené na propustném papíru. Následně se celek přikryje vakuovou folií, díky níž se odstraní vzduch z tkaniny a pomocí tepla se pryskyřice zataví do tkaniny a vytvrdne.

Díky přesné gramáži lepidla dosáhneme velkého podílu obsažených vláken, vakuová folie chrání před škodlivými účinky pryskyřice a metoda je levnější oproti pregreové s většinou jejich výhod. Je však stále potřeba pec vakuová folie což zvyšuje výrobní náklady.

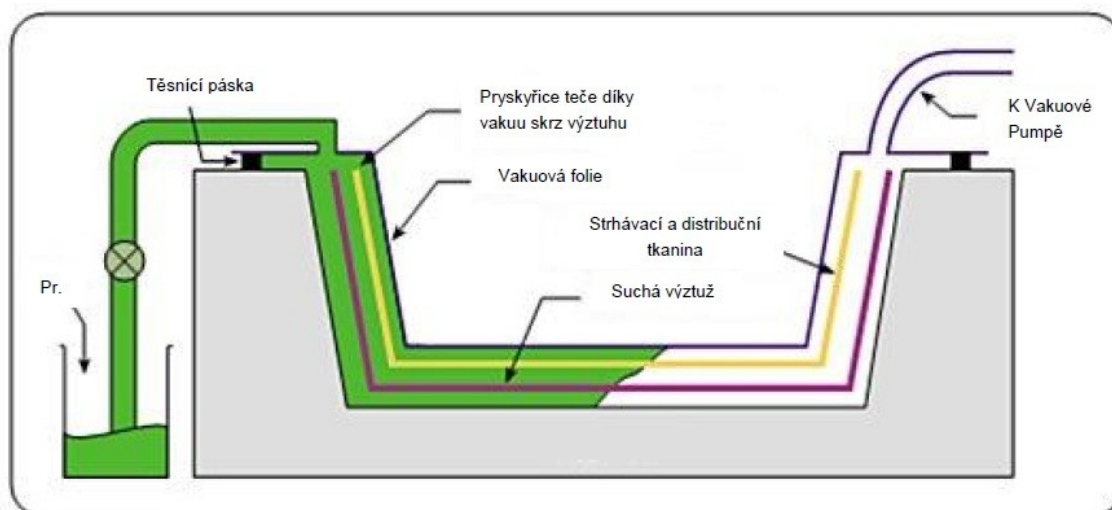


Obrázek 15: Metoda RFI [9]

j) Ostatní infuzní metody

Tkaniny se vkládají podobně jako u metody RMT do formy suché. Samotná vlákna se pokrývají tenkou vrstvou strhávací a distribuční tkaniny, kterou se podpoří prolnutí pryskyřice přes kompozit díky snadnému toku pryskyřice přes tkaninu a její smáčení shora. Celek se přikryje vakuovou a prosakující folií a vpustí se do něj matrice. Celek se přikryje vakuovou a prosakující folií a vpustí se do něj matrice.

Výhody těchto technologií jsou obdobné jak u metody RTM jenomže se formuje pouze jedna strana výrobku a tím se dosáhne nižší ceny za formu. Tato metoda také umožňuje výrobu větších částí. Proces výroby je ale poměrně složitý a je zapotřebí pryskyřice o nízké viskozitě, a pokud se vytvoří neprosycená místa na tkanině je třeba výrobek upravit což může znamenat tvorbu zmetku a prodražení celkových nákladů.



Obrázek 16: Ostatní infuzní metody [9]

4.5 Zpracování vláknových kompozitů

Text v této kapitole vychází z literatury [10]

Čím dál tím větší využití kompozitních materiálů, v tom hlavně vláknových kompozitů, a specifika jejich výroby vyvolávají potřebu vývoje reálných metod zpracování. Lamináty se vyznačují nehomogenní strukturou, anizotropií a zpevňujícími materiály s abrazivními vlastnostmi, co při jejich zpracování vyvolává mnohé problémy. Například během obrábění (zejména při vrtání) kompozitů s polymerní matricí se vyskytují takové problémy jak: přetržení vlákna, prasknutí matrice, ztráta spojitosti vlákno/matrice, tepelná degradace polymeru, tažení vláken, prašnost, drobení nebo delaminace (rozvrstvení). Výztužnými materiály jsou mezi jinými sklo, grafit, bor, korund nebo karbid křemíku SiC, které se vyznačují vysokou tvrdostí a tím pádem mají intensivní vliv na opotřebení náradí. Navíc, vlastnosti matrice, vzájemný objemový podíl matrice a zpevňujících vláken a především velikost, způsob spletení, rozmístění a orientace vláken ovlivňují výběr geometrie nástroje a také průběh a výsledky výrobního procesu.

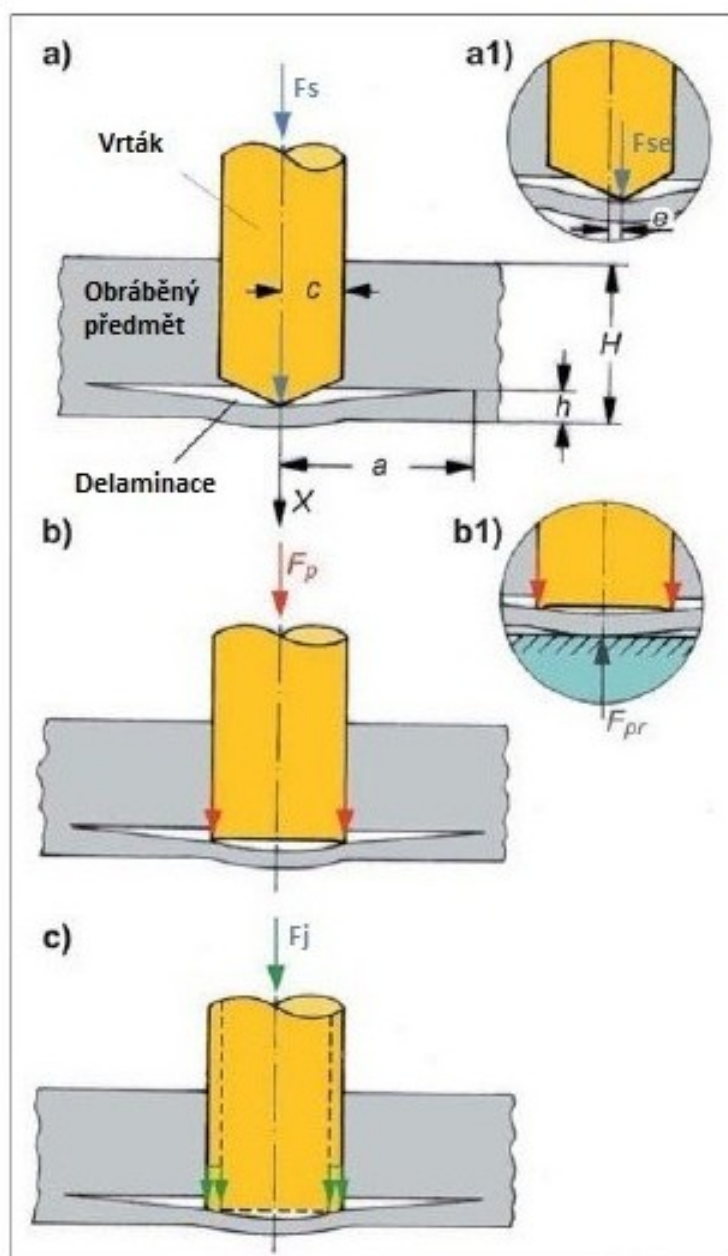
Uhlíková a skelná vlákna pod vlivem ohybových napětí podléhají křehké lámavosti, zatímco v případě aramidových vláken pod vlivem deformačního ohýbání, dochází k stříhovým trhlinám a roztržení působením tahového napětí. Jestliže uhlíková a skelná vlákna způsobují abrazivní opotřebení náradí, tak aramidová vlákna mohou vyvolat adhezivní opotřebení, vzhledem k nízké tepelné vodivosti a k tendenci usazování se na povrchu nástroje vrstvy v podobě zuhelnatělé nebo roztavené polymerní matrice.

Některé poznatky vyplývající z nejnovějších studií procesu vrtání a frézování vláknových kompozitů s polymerní matricí a také kompletů složených z lehkých konstrukčních materiálů takých jak hliník, titan, a CFRP.

a) Delaminace

Před uvedením vybraných výsledků studií a použitých řešení v praxi je třeba věnovat pozornost jevu delaminace. Je to jeden z nejzávažnějších a nejčistších defektů objevujících se při obrábění vláknových kompozitů. Objevuje se hlavně, když nářadí vychází z materiálu, způsobujíc, že spodní vrstvy kompozitu mohou být odděleny od obráběné části v oblasti obklopující obráběný otvor. V určitém bodě procesu obrábění zátěž pocházející z obráběcího nástroje překračuje hodnotu mezimolekulárních vazeb a dochází k delaminaci. Delaminace může způsobit snížení nosnosti a negativně ovlivnit životnost kompozitů snížením celistvosti struktury, projevující se dlouhodobým zhoršením jeho vlastností.

Nejvíce rozšířeným způsobem provedení otvorů ve vláknových kompozitech je vrtání šroubovitými vrtáky (Obrázek 17a). V případě šroubovitých vrtáku po regeneraci, eventuální excentricita zaostření (Obrázek 17a1) může zhoršit kvalitu obráběcích úkonů. Aby se zabránilo delaminaci je možné zmenšit axiální (osový) posuv, což má ale negativní vliv na výkonnost obráběcího procesu. Experimenty prováděné s pilovými vrtáky (Obrázek 17b) a jádrovými vrtáky (Obrázek 17c) prokázaly, že způsobují menší delaminaci než spirálové vrtáky, díky lepšímu rozložení řezných sil v blízkosti obvodu otvoru. Delaminace může být minimalizována nebo úplně odstraněna snížením rychlosti osového posuvu v blízkosti ústí otvoru nebo použitím podpůrných desek (block-up plates), které zabraňují deformaci vrstvy kompozitu při ústí nástroje (Obrázek 17b1).



Obrázek 17: Působení odporových sil v průběhu vrtání na delaminaci [10]

a-poloměr delaminace, c-poloměr vrtáku, e-excentricita, h-tloušťka delaminace, H-tloušťka materiálu, F_s -přítlak šroubovitého vrtáku, F_p -přítlak pilového vrtáku, F_j -přítlak jádrového vrtáku, F_{pr} -síla podpůrné desky, F_{se} přítlak při excentricitě

Obrábění kompozitů je obtížné a je tedy zapotřebí věnovat velkou pozornost správné volbě nejenom samotného nástroje, ale i materiálu, z kterého je vyroben.

b) Metody zpracování vláknových kompozitů s polymerní matricí

Otvory v materiálech CFRP a GFRP se realizují pomocí vrtání, frézování nebo šroubovicové interpolace. Tyto klasické metody vrtání se používají hlavně z důvodu poměrně jednoduché manipulace a jejich rychlosti, bohužel je však doprovázejí vysoké teploty nebo poškození materiálu když vrták vychází z materiálu. Církulární (kruhové) frézování s pohybem po kruhové dráze a zároveň axiálním frézy se vyznačuje malými teplotami při obrábění, menší osově zatížení předmětu nebo nezávislý od vrtáku průměr otvorů. Tato metoda je však dražší z důvodu zvýšených nákladů týkajících se realizace programu řídicího procesu a taky vysokých otáček vřetena.

V poslední době se jako alternativní metoda používá patent společnosti Novator a to šroubovicová interpolace (orbitální vrtání), která se liší od frézování a klasického vrtání. Šroubovicová interpolace je odebírání materiálu v axiálním a zároveň radiálním směru kdy se vrták otáčí kolem vlastní osy a osy otvoru při procesu zahlubování se vrtáku do materiálu. V porovnání s klasickým vrtáním má mnoho výhod jak:

- ostří vrtáku není nepohyblivé, zmenšení osových sil a rizika delaminace v kompozitech
- průměr vrtáku je menší než průměr otvoru což umožňuje lepší odvod tepla a třísek
- regulovatelná mimostřednost vrtáku vzhledem k otvoru
- eliminace rizika zbroušení vrtáku například z důvodu nejednotvárnosti a tím pádem ztráty přesnosti tvaru otvoru

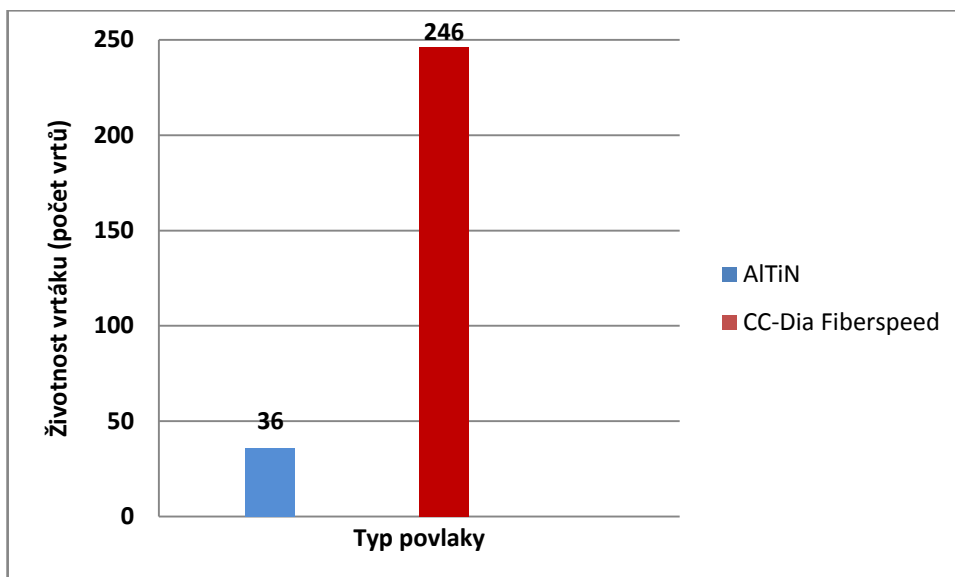
Šroubovicová interpolace je realizována mechanicky s použitím vřeten „TwinSpin“, proces obrábění je rychlejší a zvětší se také jeho přesnost dokonce i u velmi malých otvorů. To je důležité zvláště v letectví, kde se vyžaduje provedení velkého množství otvorů (například pod nýty v trupu letadla (Obrázek 18)) protože přenosná mechanická zařízení k šroubovicové interpolaci jsou efektivnější a komfortnější při provozu.



Obrázek 18: Vrtání otvorů pod nýty v trupu z kompozitů GLARE letadla Airbus A380 s využitím šroubovicové interpolace a vrták ke šroubovicové interpolaci [10]

Porovnání mezi klasickým vrtáním a frézováním kompozitů CFRP také přineslo zjištění, že otvory realizované vrtáním mají o něco lepší přesnost tvaru a rozměrů. Frézováním, za účelem zachování rozměrů, však můžeme provádět korekce spirálové dráhy. Kvalita zpracování na výstupní straně otvoru, umožňuje zjistit přednosti frézování vyplývající z menší osově síly a příznivějších teplot při procesu. Proto tam, kde se vyžaduje vysokých kvalit na výstupní straně, často se mění průměr otvorů a vyskytují se předměty citlivé na vysoké teploty, se upřednostňuje frézování. Všechna jiná vymáhání lépe splňuje vrtání.

K obrábění se hlavně používá zároveň vrtáky jak i frézy s ostřím z polykrystalického diamantu (PKD) nebo tenké diamantové povlaky nanášené metodou CVD (Chemical Vapour Deposition). Hlavní rozdíl mezi povlakem tohoto typu a PKD je v téměř čisté vrstvě diamantu, vytvořené bez spojitě fáze z kobaltu. Společnost CemeCon vyvinula metodu, která umožňuje úspěšné nanášet CVD diamantové povlaky na slinuté karbidy, obsahující až do 12% kobaltu i s větším podílem dodatečných karbidů. Při použití vrtáku s nanesenou variantou CVD diamantové povlaky v podobě CC-Dia Fiberspeed, bylo při vrtání do CFRP dosaženo několikrát lepších obráběcích výsledků jak v případě vrtáku bez povlaku tak i s povlakem AlTiN (Obrázek 19) bez poškození nástroje nebo povlaky. To samé se týká také vrtání do materiální sady CFRP – Al. Tohoto efektu se dosahuje následkem zoptimalizování přilnavosti povlaky k slinutým karbidům a tím samým významného zmenšení obvodového opotřebení vrtáku.



Obrázek 19: Srovnání životnosti vrtáku s povlakou AlTiN a diamantovou povlakou CC-Dia Fiberspeed při vrtání CFRP [10]

Například při stavbě vojenského přepravního letadla Airbus A400M, se k realizaci otvorů pod nýty, sloužících ke spojení podélníků a povlaku křídla (Obrázek 20), používají vrtáky s mnohovrstvým nánosem povlaky typu CC-Dia společnosti CemeCon. Díky výjimečné tvrdosti těchto povlaků je ostří dvakrát víc odolné na abrazivní opotřebení, způsobené vlastnostmi CFRP. Navíc je diamant odolný vůči chemickým vlivům, čímž se zabrání adhezi obráběného materiálu. Používání vrtáku bez povlaku nebo s povlakem nanášeným metodou PVD nezaručovalo požadované přesnosti otvorů v třídě přesnosti H8.



Obrázek 20: Vrtáky CC-Dia Fiberspeed se osvědčily i při vrtání otvorů pod nýty na letadle Airbus A400M [10]

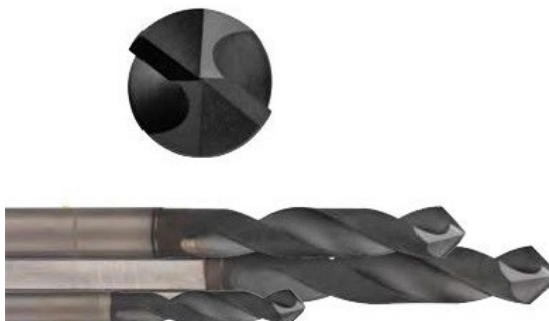
Výsledkem pokroku v diamantových povlácích se zvětšila účinnost nástrojů k obrábění kompozitních materiálů. (Obrázek 21)



Obrázek 21: Fréza s diamantovým povlakem společnosti Prototyp Werke [10]

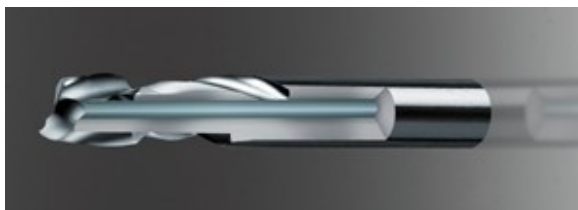
Na obrázku je jako příklad frézový vrták společnosti Prototyp Werke o průměru 10 mm s diamantovým povlakem, určený k obrábění kompozitů CFRP a GFRP s voštinovou strukturou, používaných na části leteckých konstrukcí. Mnohé společnosti, které vyrábí nástroje, mají ve svých výrobních programech nástroje k obrábění kompozitů. Sandvik Coromant, Kennametal, Mapal a mnoho jiných podniků se snaží optimalizovat materiál a geometrii náradí za účelem efektivního tvarování kompozitů. Například firma Mapal vyvinula k obrábění nosníku svislých ocasních ploch letadla, PKD frézové vrtáky typu HP-FaceMill a Hp-EndMill. Tyto jednoduše vyrobené nástroje s odolnými ostřími z PKD umožňují, díky vysokému množství ostří, použití vysokých hodnot posuvů.

Společnost Kennametal jako alternativu pro vrtáku z PKD navrhla celokarbidové vrtáky SPF (Obrázek 22) určené k obrábění CFRP na soustruzích CNC. Hladký, diamantový povrch těchto vrtáků neobsahuje, na rozdíl od PKD, žádné kovové spojovací fáze. To způsobuje zvětšení odolnosti vůči opotřebení, menší sklon k adhezi a také lepší odvod třísek. Uzpůsobení přední a řezné části vrtáku k obrábění kompozitů zaručuje zvětšenou schopnost k samocentraci a zmenšení osové síly, což podle názoru výrobce zlepšuje kvalitu otvoru a značně redukuje delaminaci.



Obrázek 22: Celokarbidové vrtáky SPF s diamantovým povlakem CVD
[\[www.kennametal.com\]](http://www.kennametal.com)

Frézový vrták Tuff-Core společnosti Onsrud Cutter LP (Libertyville, USA), zas podle výrobce vytváří v kompozitních materiálech hrany bez otřepů, což je obzvláště důležité v letectví. Zvláštnosti těchto nástrojů je to, že jsou vyrobeny ze dvou různých vrstev ze slinutých karbidů. (Obrázek 23). Jádru vrtáku je tvořeno tvárným substrátem s větším podílem kobaltu a mělo by odolat vyskytujícím se silám a napětím. Vnější vrstva s příslušným podílem karbidu se vyznačuje odolností vůči opotřebení.



Obrázek 23: Dvouvrstvý fréz Tuff-Core k realizaci hran bez otřepů v kompozitech
[<http://www.plasticmag.com>]

Protože vrtání kompozitů je, z důvodu jejich anizotropie a různorodosti, stochastický proces, hledají se alternativní způsoby realizace otvorů v těchto materiálech. Patří k nim například laserové obrábění, obrábění vysokotlakou vodní tryskou, vibrační vrtání atd. Vibrační vrtání se od klasického liší pulzním, přerušovaným řezným procesem. Bylo zjištěno, že odporová síla při vibračním vrtání polymerních vláknových kompozitů je menší než při klasickém vrtání a navíc je dobrý vztah mezi silou a koeficientem delaminace, chápaným jako podíl maximálního průměru poškozené oblasti kolem otvoru a průměru vrtáku. Proto sledováním odporové síly je možno ovlivnit snížení defektů při procesu vrtání kompozitů.

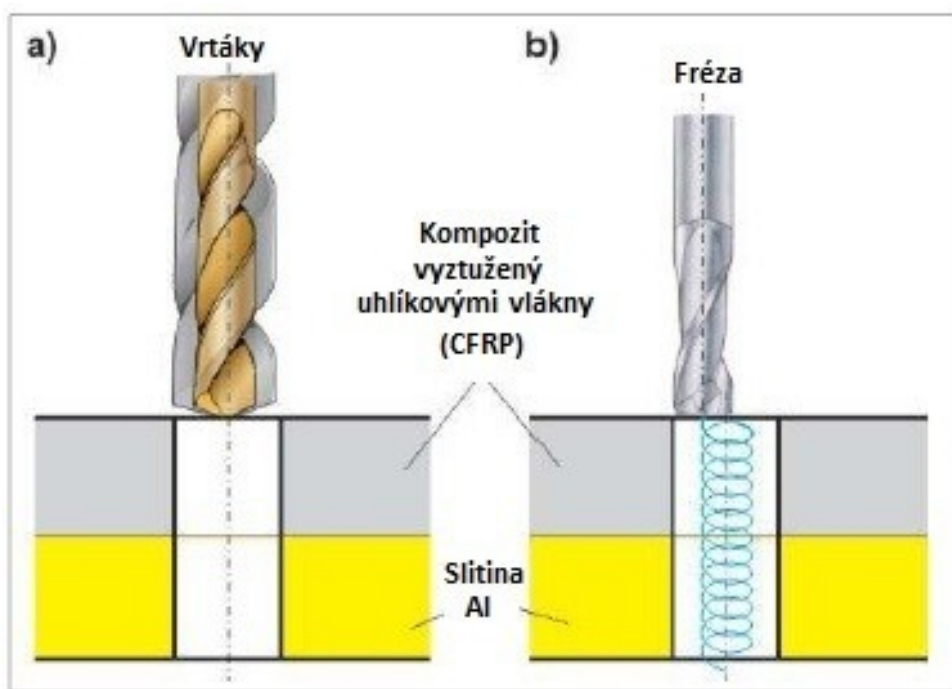
c) Obrábění vrstvených materiálu

Při stavbě letadel nacházejí, čím dal tím větší uplatnění vrstvené materiály, skládající se z lehkých a pevných konstrukčních materiálu, takových jak CFRP, slitiny hliníku nebo slitiny titanu. Konstrukční části tohoto typu většinou obsahují různé typy otvorů jako například montážní otvory pro nýty nebo šrouby. Obrábění vrstveného kompozitu se složkami s úplně odlišnými vlastnostmi způsobuje mnohé potíže, zvláště když otvory procházející naskrz vyžadují vysokou třídu přesnosti (například toleranční třída H8) a musí mít vysokou kvalitu povrchu.

Studie obrábění otvorů ve dvouvrstevném kompozitu CFRP – hliník prokázaly, že z důvodu nepříznivých podmínek vrtání, dochází během procesu k velkému termickému a mechanickému zatížení ostří a v důsledku toho zvýšeného opotřebení nástroje. Třecí síly mezi třískami, odváděnými drážkami vrtáku, a stěnou otvoru

způsobují, spolu s rostoucí hloubkou otvoru větší momenty a síly vrtání. Navíc třísky tvrdšího materiálu mohou způsobit poškození povrchu měkčího materiálu. Realizace otvorů v toleranční třídě H8 vyžaduje použití několika vrtáku se zvětšujícími se průměry.

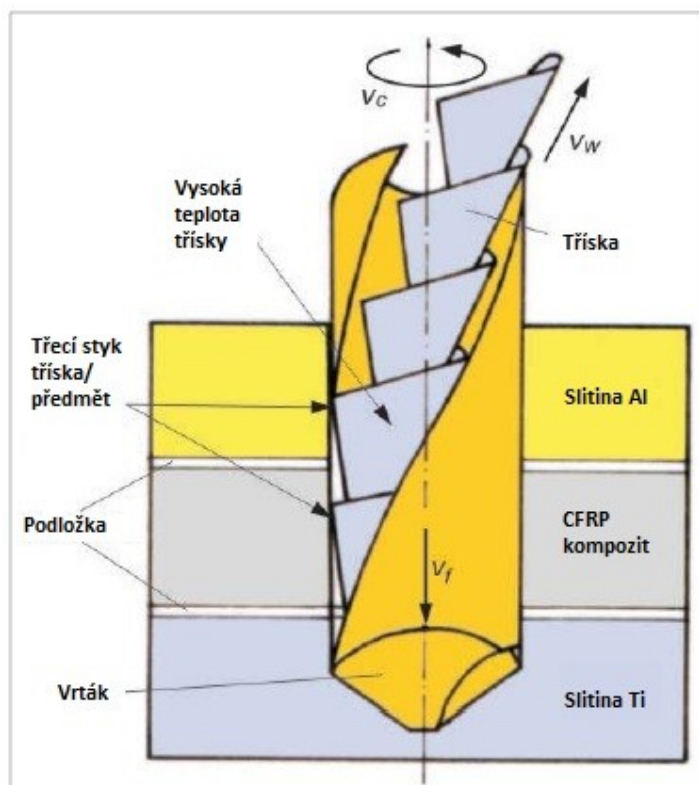
Frézováním se můžeme těmto problémům vyhnout. Vrták vchází do materiálu po spirálové dráze a vytváří otvor přerušovaným procesem (Obrázek 24). Tento způsob je mnohem vhodnější než vrtání z důvodu flexibility a množstvím potřebných vrtáků. Kinematika frézování zajišťuje menší termické zatížení vrtáku a obráběného předmětu, lepší odvod menších třísek a má také pozitivní vliv na opotřebení nástroje. Správný výběr obráběcího procesu a náradí má tedy vliv na přesnost otvoru s vysokou kvalitou ve vrstvených materiálech.



Obrázek 24: Nejčastější způsoby realizace otvorů v materiálech skládajících se z CFRP a slitiny hliníku: a) vrtání, b) frézování [10]

Jiné studie vrtání ve vrstveném kompozitu hliník – CFRP, přinesla zjištění, že použití stupňovitého vrtáku (o průměru menším a rovným koncovému průměru otvoru), povlaky z TiB_2 a zvlášť minimálního mazání s použitím mastného alkoholu (fatty alcohol) dodávaného vnitřními kanálkami vrtáku, umožnilo stejné, vysoké přesnosti podél celého otvoru. Díky minimálnímu mazání se téměř kompletně odstranila adheze hliníku a také vznik taveniny na řezných hranách a bočních plochách vrtáku.

V průběhu vrtání vrstveného kompozitu, tvořeného Al – CFRP – Ti vliv odvodu třísek podél drážek vrtáku a také tendence titanu ke tvorbě adhezivních vazeb, vytváří mnoho problému. Titanové třísky, odváděné skrze vrstvu CFRP (Obrázek 25), způsobují rýhy na povrchu otvoru a také delaminaci kompozitu a podložky (shim), která se nachází mezi CFRP a titanem. Kromě negativního působení třísek, mají vliv na toleranci průměru otvorů také různé vlastnosti materiálu, jako je modul pružnosti. Navíc třecí kontakt mezi titanem a povrchem vrtáku způsobují dodatečné termická a mechanická zatížení na řezných hranách a tím pádem má značný vliv na opotřebení nástroje. Horké a ostré třísky titanu zhoršují kvalitu povrchu otvoru a mohou způsobit komplikace v průběhu montáže. Největší vliv na opotřebení nástroje mají parametry obrábění a geometrie vrtáku.



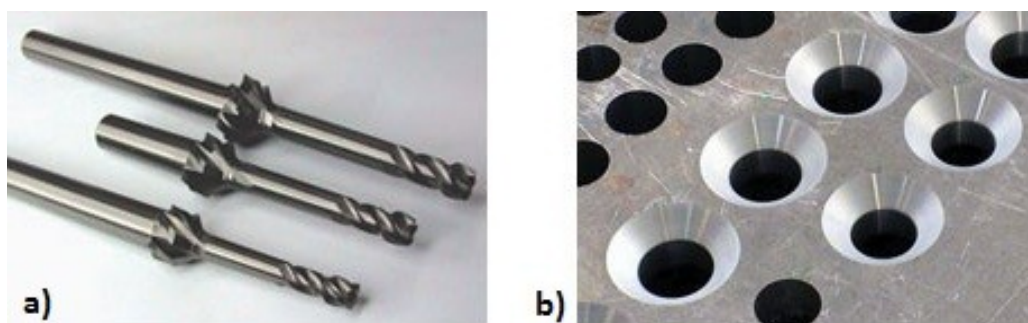
Obrázek 25: Problematika odvodu třísek ve vrstveném materiálu slitina Al-CFRP-slitina Ti [10]

Společnost Sandvik Coromant se zabývala postupem realizace otvorů ve vícenásobných kompozitech, používaných pro takové konstrukční části letadla jako je trup, dveře a nosníky. Splnění podmínky aby otvory nenesly jakékoliv stopy delaminace nebo otláčené stopy závitů ve vrstvě CFRP, se dosáhne díky vícefázovému provedení otvorů:

- vrtání kovové vrstvy klasickým vrtákem
- jádrové vrtání otvoru o menším průměru v kompozitu za účelem minimalizace delaminace a otřepů
- rozvrtání otvoru do konečného průměru s použitím výstružníku s diamantovým povlakem

Nutnost provedení kuželového zkosení otvoru vyžaduje použití dalšího nástroje. Společnost Kennametal, společně se švédskou firmou Novator AG (Spanga), vypracovala následující způsob provedení otvorů ve vrstvených kompozitech (Obrázek 26):

- vrtání otvorů o menším průměru
- šroubovicová interpolace vrtákem z PKD, kvůli zvětšení průměru otvoru bez delaminace
- eventuální provedení kuželového zkosení otvoru



Obrázek 26: a) Vrtáky firmy Kennametal ke šroubovicové interpolaci, b) vyvrtané otvory šroubovicovou interpolací firmy Novator ve vrstveném materiálu kompozit-kov bez delaminace [<http://www.sme.org>]

Výrobci letadel, kteří se zabývají zmenšením obráběcích sil a dosažením lepší konečné kvality povrchu, můžou díky šroubovicové interpolaci ušetřit až kolem 50% času určeného k montáži.

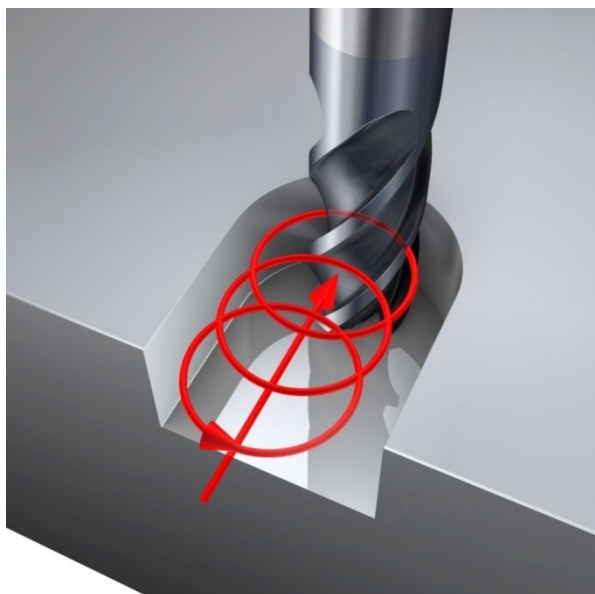
4.6 Obrábění titanu

Text v této kapitole vychází z literatury [4]

Titan a jeho slitiny jsou problematičtější k obrábění hlavně z důvodu větších řezných sil, které vznikají při obrábění, v porovnání s ocelí o stejné tvrdosti. Vyšší řezný odpor znamená vyšší tepelné zatížení nástroje. Díky nižší tepelné vodivosti titanu i samotné jeho třísky při obrábění déle drží teplo, což taky přispívá k vyššímu zatížení nástroje a tím i k jeho rychlejšímu opotřebení. Konkrétním problémovým příkladem může být frézování kapes. Když je nástroj delší dobu v záběru je vystaven vysokým teplotám. V úzké drážce navíc může dojít k opětovnému obrobení již oddělené třísky. Tyto problémy spolu se špatným odvodem třísek znamenají potřebu snížení řezných parametrů a v důsledku toho snížení produktivity. Vývoj titanu a jeho početnější využití přináší potřebu hledat nové technologie, které budou mít efektivní produktivitu, přesnost, spolehlivost a co nejmenší namáhání nástroje. Jednou z takových technologií je trochoidní frézování.

a) Trochoidní frézování

Tento způsob frézování byl vyvinut k frézování drážek technikou HSM (High Speed Machining), vysokorychlostního obrábění. Využívá konstantní kruhové interpolace s radiálním posuvem nástroje ve směru řezání (Obrázek 27).



Obrázek 27: Princip trochoidního frézování
<http://www.fabricatingandmetalworking.com/>

Trochoidní frézování se donedávna málo používalo, protože některé CAM systémy měly s tímto typem frézování problém. Výrobci CAM softwaru však nedávno přidali trochoidní frézování jako jednu ze sekcí CNC programování a tak tato metoda nyní získává na popularitě. Hlavními výhodami jsou:

- díky použití menšího nástroje než je předepsaná šířka drážky je možné jedním nástrojem vyrábět různé šířky drážek
- Menší radiální síly při obrábění umožňují využít frézy s větším počtem zubů a tím dosáhnout vyššího minutového posuvu
- výrazné snížení obráběcích časů

4.7 Využití kompozitů na Boeingu 787 Dreamliner

Text v této kapitole vychází z literatury [5]

Z váhového hlediska kompozity na „Dreamlineru“ stanoví polovinu jeho hmotnosti. Díky jejich použití v konstrukci se dosáhlo nejen snížení celkové váhy letadla, ale také bylo možno použít nové koncepce při projektování. Dosáhlo se také prodloužení životnosti letadla a udržení vyššího tlaku v kabině. Hlavní motivací pro výrobce však byla, díky výraznému snížení hmotnosti, úspora paliva a tím i delší dolet letadla. Při detailnějších studiích se však zjistilo, že jsou možné změny i v samotném projektu, které by umožnily integraci funkčních systémů a také změny v laminárním proudění, díky nimž by se zlepšila aerodynamika letadla.

Z materiálního hlediska je Boeing 787 Dreamliner jedním z nejvíce pokrokových letadel v historii průmyslové výroby. Než však vůbec byl první kus vyroben, bylo třeba vyřešit obrovské překážky:

- Nikdy předtím se nezkoušelo vyrábět v tak velkém měřítku rozměrných konstrukcí, u kterých byl použit kompozit vyztužený uhlíkovými vlákny, který je materiálem vyžadujícím tepelné vytvrzování a značně delší dobu zpracování než termoplasty
- Hlavní vybavení potřebné k produkci tak velkých částí bylo stále ve fázi návrhu
- Bylo třeba vyvinout nové potahy z důvodu problému šíření trhlin, který v případě hliníku nebylo třeba řešit

Samotná materiálová technologie však pro výrobce nebyla neznáma oblast. Když se Boeing rozhodl pro použití kompozitů na 787 ke konstrukci křídel, trupu, stropních nosníků a tak dále, zvolil cestu využití materiálu, s kterým již měl zkušenosti z verze 777. Inženýři již věděli jakým způsobem kompozity ovlivňují výrobní proces a měli databázi přípustných výrobních technik. Váhově se Boeing 777 skládá z 9% procent kompozitních komponentů, přičemž Boeing 787 z 50%. Během provozu 777 byly plastické materiály vyztuženy uhlíkem (kompozity) vylepšeny, z hlediska vlastností, výrobních technologií a struktury nákladu.

Všechny kompozity pro Boeing 787 dodává společnost Toray Industries, která je největším producentem uhlíkových vláken na světě. Od roku 2004 Boeing u tohoto výrobce podává objednávky na kompozity v odhadované hodnotě 6 mld. dolarů (přibližně 117 mld. Kč), čímž vyvíjí tlak na ceny a dodávky pro ostatní klienty. Tento údaj vychází z předpokládané produkce pro rok 2006.

Jedním z problémů spojených s hromadnou výrobou je o mnoho delší výrobní proces v porovnání s termoplasty. Nejdůležitější řešení poskytli výrobci tradičních obráběcích strojů. Nástroje představovaly velký problém hlavně kvůli jejich rozměrům, které se rovnaly velikosti letadla. Dříve se vybavení pro výrobu kompozitů používalo hlavně za účelem výroby lodí což není obor pro hromadnou výrobu. Hlavním materiálem pro výrobu vybavení tohoto typu je slitina železa a hliníku, které se říká Invar. Jeho hlavní předností je kontrolovaný koeficient tepelné roztažnosti. Problém Invaru je však ten, že se moc dobře nehodí pro systémy štíhlé výroby (tzv. lean manufacturing - výrobní postup, kdy chce producent co nejvíc vyhovět zákaznickým požadavkům tím, že vyrábí pouze to, co zákazník požaduje), která je po několik let důležitým cílem společnosti Boeing. Další jeho nevýhodou je vysoká cena, hmotnost a rozměry. Alternativou jsou „měkké“ nástroje, které jsou taky vyrobeny z kompozitního materiálu. Technologie používané pro výrobu Dreamlinera jsou přísně právně chráněny. Uniklo však několik informací, ve kterých se mluví o společnosti Janicki Industries (Seedro-Wooley, Washington). Tento dlouholetý výrobce lodí, vyvinul nové, měkké vybavení pro výrobu Dreamlinera, které se ukázalo být velmi úspěšné. Janicki například vyrobil na zakázku tři pětiosé CNC stroje, které mohou provádět obrábění dílců o rozměrech až $88 \times 19 \times 8$ stop s přesností $\pm 0,03$ palců (přibližně $27 \times 6 \times 2,5$ m, s přesností 0,8 mm).

Nejenom z hmotnostních důvodů mají kompozity velkou budoucnost v leteckém průmyslu. Konstrukce může být také součástí systému redukce hluku, tepelného přenosu nebo elektroinstalace. Dále také, díky vyšší pevnosti trupu a tím možností vyššího tlaku uvnitř letadla, lepší řízení teploty, vlhkosti a ventilace. Konstrukce 787 je v podstatě jedná velká makromolekula, protože je vše spojeno pomocí chemických vazeb zpevněných uhlíkovými vlákny. Cílem konstruktéra bylo vyrobit trup z jednoho kusu.

Boeing přišel i s inovací v oblasti technologie nátěru kompozitů. Kompozity sice nepodléhají korozi, ale vyskytuje se u nich proces fotooxidace. Proto je třeba kompozity pokrýt ochranným nátěrem. Inovace spočívá v středním, izolačním nátěru. Lak na letadle je možno měnit bez nutnosti obroušení až na kompozit. To znamená, že odpadá proces pískování starého nátěru.

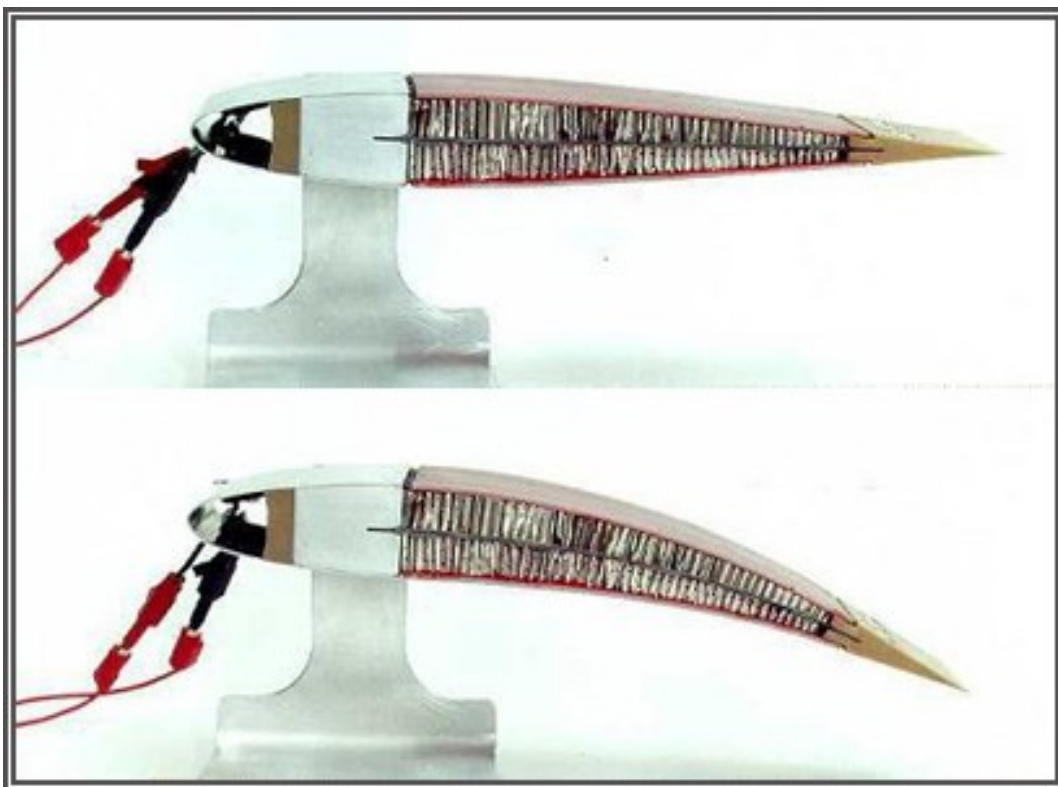
Kompozitní konstrukce vyžadují také jiný přístup v oblastech spojených s teplotou a proudem než je tomu v případě hliníkových konstrukcí, které mají vyšší tepelnou a elektrickou vodivost. Například způsob odvádění zkratových proudů je jednodušší než v případě konstrukcí z hliníku. Boeing má svoje technologie, které mu usnadňují vyřešit tyto problémy a to je jeden z důvodů proč udržuje v tajnosti informace týkající se konkrétních technologických partnerů, například výrobců nářadí. Veškeré informace poskytované médiím jsou přísně společností kontrolovány.

4.8 Inteligentní materiály

Text v této kapitole vychází z literatury [6]

Smart materials neboli inteligentní materiály jsou takové, které reagují na určitý podnět vytvořením užitečného efektu poté jsou schopny se vrátit do původní podoby. Takovým podnětem může být tlak, teplota, napětí, chemické látky, elektrické nebo magnetické pole a jiné. Mezi inteligentní materiály patří například piezoelektrické materiály, které fungují na principu piezoelektrického jevu (schopnost materiálu generovat napětí při jeho deformování, nebo naopak se deformovat vlivem elektrického napětí).

Nad vývojem inteligentních materiálů a jejich uplatněním v leteckém průmyslu pracují mimo jiné i v Polsku na Ústavu inteligentních technologií (Institut základních problémů techniky, Polská akademie věd, Varšava). Snem konstruktérů je aby se křídélka staly integrální součástí křídla. Inspirují se tak na příkladech delfiních ploutví. Právě zde nacházejí uplatnění piezoelektrické materiály. Prozatím jsou tyto typy křídel ve fázi laboratorních pokusů, ale podle odborníků by se mohly v průběhu několika let začlenit do velkovýroby letadel.



Obrázek 28: Příklad využití inteligentních materiálů [\[http://puntorete.wordpress.com/\]](http://puntorete.wordpress.com/)

4.9 Technologie elektropohonu

Text v této kapitole vychází z literatury [7]

a) Systém WheelTug

Jednou s revolučních novinek jsou elektromotory, které se instalují na předový podvozek a slouží k pohonu letadla při pohybu po letišti bez dalšího využití hlavních pohonných jednotek nebo jiných pozemních služeb jako jsou tahače. Motory vyvíjí společnost WheelTug plc, která spadá pod Chorus Motors. Tato firma již od poloviny 90. let investuje miliony dolarů na studie nových technologií. Celý systém je napájen s pomocné energetické jednotky APU, která doposud sloužila pouze pro takové funkce jako je napájení elektrické sítě a klimatizace když jsou hlavní motory nečinné. WheelTug pohání letadlo při poježdění z odbavovací plochy k RWY a naopak, taky umožní letadlu couvat, k čemu už nebude potřeba tahačů. Leteckým společností to přinese úspory v podobě snížení spotřeby paliva kolem 7% ročně čemuž odpovídá zhruba 600 000 dolarů za letadlo ročně. Další výhodou je poměrně snadná a časově nenáročná instalace, která by autorizovanému servisu zabrat pouze pár hodin. Systém je navrhnut tak aby se vešel do podvozkové šachty. Jedinou nutností je aby letadlo mělo dostatečně výkonný zdroj energie APU a taky u některých typů může být nezbytná úprava podvozkové konstrukce. Výhoda je i v tom, že kompletní systém není v seznamu minimálního vybavení MEL, díky čemu případné poruchy nebrání letadlu v provozu.

Výrobci právě certifikují WheelTug u Federálního úřadu pro letectví FAA (Federal Aviation Administration) pro letadlo Boeing 737NG , připravují i další verze pro Airbus A380 a jednají i s jinými výrobci o proveditelnosti zástavby u jednotlivých typů. Po dokončení certifikace okamžitě začne sériová výroba a očekává se, že koncem letošního roku by se letecké společnosti mohly dočkat prvních instalací.

b) Konstrukce systému WheelTug

Jak vlastně celý systém vypadá a z čeho se skládá? Hlavní částí jsou dva **18ti fázové asynchronní elektromotory**. Na tyto elektromotory vlastní společnost WheelTug plc patent. Jsou zcela ideální k pohonu letadel, protože jsou poměrně malé a přesto jsou schopné dosáhnout obrovského točivého momentu a oproti jiným výkonným motorům se vyznačují velkou spolehlivostí a bezpečností. Teoreticky se jimi dá vybavit jakékoliv letadlo s předovým podvozkem, díky vlastnosti, že rozměry

elektromotorů jsou závislé na váze letadla. Čím těžší letoun, tím těžší a větší elektromotor, hlavně kvůli statorovému vinutí. Konkrétně elektromotory pro Boeing 737NG váží přibližně 40 kg každý, kompletní systém pak zhruba 140kg. Maximální dopředná rychlost jakou jsou tyto motory schopny vyvinout se pohybuje kolem 40 km/h, rychlost při pohybu vzad činí 8 km/h a výkon při pojíždění je srovnatelný s hlavními motory.

Další nezbytnou součástí, bez které se celý systém neobejde, je již zmíněná **pomocná energetická jednotka APU**, jakožto jeho jediný zdroj energie. Systém pro svůj provoz potřebuje stále napětí o velikosti 40 – 45 kVA. APU na Boeingu 737NG je schopná dodat maximální výkon 90 kVA. Při vývoji systému panovaly hlavně obavy, zda pomocná energetická jednotka bude schopna dodat dostatečné množství energie. Společnost Delta Airlines v roce 2010 provedla oficiální zátěžová měření ELM (Electrical Load Measurement) na Boeingu 737NG. Detailní rozbor výsledku testů ukázal, že výkon APU je víc než dostatečný. Při testu se také zkoušelo jaký maximální krouticí moment je možno použít aniž by došlo k prokluzu kola.

Neméně důležitým komponentem elektroměrů WheelTug je **měníč napětí**. Dva měniče převádějí energii s APU. Tyto součásti jsou malé a lehce se vejdou do podvozkových šachet.

Posledním komponentem je **ovládací panel**. Na Boeingu typu 737NG se bude nacházet na středovém panelu mezi piloty. Systém je ovládán čtyřmi prvky – hlavní vypínač, přepínač funkcí, přepínač pojezdu a tlačítko držení rychlosti. Řízení je snadné a kompletně oddělené od ostatních systému na letadle aby nenarušovalo jejich funkce. Panel je vybaven třemi barevnými kontrolkami stavu systému, GPS a USB portem.

c) Hlavní výhody WheelTug

Úspora paliva

Jak již bylo zmíněno výše, hlavní výhodou je značná úspora paliva a to až 80% při srovnání s pohybem na oba hlavní motory. Hlavní motory budou při pohybu letadla po letišti spuštěné pouze těsně před vzletem a po přistání po dobu nutnou k zahřátí motorů na provozní teplotu což odpovídá průměrně 3 minutám. Jelikož elektromotor znamená pro letadlo dodatečnou zátěž bude spotřeba paliva za letu o něco vyšší, ale výsledná spotřeba bude o dost nižší a to až 100 kg paliva za jediný let a zároveň se sníží hmotnost letadla o palivo, které by se spotřebovalo při pojíždění s hlavními motory. Předpokládaná cena systému WheelTug se odhaduje na 1 milion dolarů a návratnost investice do 1,5 až 2 let.

Snížení emisí

Když se při pojíždění po letišti nebudou používat hlavní pohonné jednotky přinese to snížení emisí až o 50% co souvisí s ochranou životního prostředí, jelikož emise z letecké dopravy mají 3% podíl na celkové emisi skleníkových plynů. Emise na letištích nezpůsobují pouze letadla ale i pozemní technika, které se bude využívat v menší míře, jelikož letadlo bude schopno samo couvat a nebude potřebovat vytlačování ze stojánky.

Ochrana před nasátím cizího předmětu do motoru

Nečistoty, které letadlo nasaje, způsobují opotřebení motorů a snížení jejich životnosti. Při nasátí větších předmětů jakou jsou ptáci se motory poškodí a oprava se výrazně prodrazí. Drobné částice se usazují na lopatkách a tím snižují výkon motorů a zvyšuje se spotřeba, jelikož lopatky pro správnou funkci musí být dokonalé hladké. Nejvíce nečistot se do motoru dostane právě na letišti (85%), zejména v prašných a písečných oblastech. To vše se eliminuje díky elektromotorům, protože hlavní motory budou při pojíždění vypnuté a zaniká tak možnost nasátí cizích předmětů, dále se zvýší efektivita provozu letadel snížením možnosti odstavení z důvodu nečekané údržby a také úspora za případné opravy.

Ostatní výhody systému:

- **Snížení hlučnosti na letištích**
- **Menší opotřebení brzd**
- **Menší opotřebení hlavních motorů**
- **Větší bezpečnost pro letištní pozemní personál**

Testování v ČR

Do spolupráce se připojilo i Letiště Praha – Ruzyně a dopravce Travel Service. V rámci této kooperace se na ruzyňském letišti v zimě roku 2010 uskutečnily dvoudenní certifikační testy na Boeingu 737NG, během kterých se prověřoval minimální točivý moment potřebný k uvedení letadla do pohybu. Testy proběhly úspěšně a prokázaly dostatečný výkon elektromotorů, dokonce letadlu k pohybu stačil pouze jeden. Zkoušel se taky pohyb letadla po namrzlé a zasněžené ploše. Kola podvozku neprokluzovala dokonce ani tehdy kdy již nebylo možné použít běžných tahačů.

První zájemci

Prvními zájemci o systém WheelTug se staly národní izraelský aerolinie El Al Airlines a indické aerolinie Jet Airways.

4.10 Použití biopaliv

Text v této kapitole vychází z literatury [8]

Biopaliva v poslední době získávají na své popularitě hlavně z důvodu omezenosti ropných zdrojů a také kvůli tomu, že jejich spalováním vzniká menší procento škodlivých plynů. V neposlední řadě je nespornou výhodou i jejich menší hmotnost což se projeví na snížení celkové hmotnosti letadla. Letecká biopaliva se tedy jeví jako slibná reakce na emisní povolenky, které Evropská Unie zavedla i pro leteckou dopravu. Tyto biopaliva jsou již používána v pozemní dopravě a jejich zavedení i v letectví přinese velkou úsporu zásob ropy, která je zdrojem pro výrobu leteckého paliva – kerosinu ať už se bude jednat o částečné nebo úplné nahrazení dosavadních pohonných hmot. Německá společnost Lufthansa již toto palivo na zkušební dobu využívala. Do jednoho ze svých letadel Airbus A321 tankovala směs tvořenou z poloviny

biopalivem a z poloviny klasickým kerosinem. Samotná výroba těchto pohonných hmot je nejvíce problémová především z důvodu pěstování plodin, ke kterým je potřebná půda jenž by mohla sloužit plodinám k výživě lidí. British Airways proto od roku 2015 mají v plánu používat biopaliva vyrobené z odpadků. V roce 2011 Evropská komise, producenti biopaliv a evropské aerolinie podepsali dohodu, díky které se do roku 2020 má zvýšit produkce těchto pohonných hmot pro leteckou dopravu na dva miliony tun. „Biokerosin“ jak se toto palivo označuje má však zatím také pár nevýhod. Aby se mohl začít běžně používat musí mít stejnou energetickou hodnotu jakou má kerosin. Dosavadní paliva používané v automobilovém průmyslu, tzv. biopaliva první generace, však těchto hodnot nedosahují. Nejsou ještě také plně ověřené jejich vlastnosti, takže se neví, zdali by palivo ve velkých výškách například nezamrzalo nebo by se v něm mohly vytvořit krystalky, které by pak mohli ucpat přívod paliva a vést ke katastrofě. Mnozí odborníci se proto domnívají, že biopaliva první generace se budou moci používat pouze jako příměs do kerosinu.

Biopaliva 2. generace

Tyto paliva jsou také označovaná zkratkou BtL (Biomass to liquid). Surovinou pro jejich výrobu je tzv. nepotravinářská biomasa, která se získává například z těžebních zbytků, zemědělského odpadu, energetických rostlin (např. šťovík) nebo biologický odpad z domácností. Technologický proces zpracování těchto surovin je však složitější. Vytvořena biomasa se náročnými chemickými procesy upravuje do podoby vysoce energeticky účinné kapaliny. Studie prokázaly, že při spalování těchto biopaliv se do atmosféry uvolňuje pouze takové množství CO_2 , jaké množství plodiny při pěstování odebraly s atmosféry, což určitě velmi potěší ekology.

5. Zhodnocení a komentář k použitelným novým technologiím

I kdyby se v budoucnu snížily ceny paliv, tak ropa bude stále nedostatkovým zbožím a její náhražky, jako jsou například biopaliva, také podraží. Můžeme také očekávat zvýšený nátlak ze strany ekologických organizací a příkazu na zmenšení emisí CO_2 produkovaných dopravou. Za těchto podmínek snižování hmotnosti dopravních prostředků bude stále ve středu pozornosti jejich výrobců a kompozity společně s ostatními lehkými konstrukčními materiály budou mít čím dál tím větší význam a s nimi samozřejmě i technologie výroby a obrábění těchto materiálů. Kompozity se zatím osvědčily u malých sportovních letadel a ultralightů, ale doposud nebyly v tak velkém množství využity pro výrobu dopravních letadel a nevíme jak na ně v praxi bude působit provoz ve velkých výškách a co s nimi po nějaké době udělá.

6. Závěr a splnění cíle práce

V práci jsem uvedl studii několika technologií, které se používají, nebo které jsou ve fázi pokusů a mohly by se v horizontu příštích několika let začít používat pro výrobu dopravních letounů. Co se týče dalšího směru vývoje je velmi obtížné odhadnout jak budou vypadat letecké konstrukce v budoucnu neboť ani sami výrobci letadel to přesně nevědí. Investují kapitál do revolučních projektů, které se nakonec ani neuskuteční jako tomu bylo i v případě Boeingu Sonic Cruiser, letadla s velkým doletem jenž mělo létat rychlostí blížíící se rychlosti zvuku. Problém je v tom, že o směru vývoje nerozhodují výrobci. Ti můžou předložit různé koncepty, ale konečným rozhodujícím faktorem jsou zákazníci – letecké společnosti, které jsou ovlivňovány ekonomickou situací. Právě ekonomické problémy byly hlavním důvodem proč se projekt Sonic Cruiser neuskutečnil.

Použitá literatura

- [1] KONSTRUKCE, UČEBNICE, OPORY [online]. Dostupný z:
<http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/construction.php#9>
- [2] LETECKADOPRAVA.ESTRANKY.CZ. Výroba letadla [online]. Dostupný z:
<http://www.leteckadoprava.estranky.cz/clanky/technika/vyroba-letadla.html>
(26.9.2006)
- [3] ISCAR. Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě [online]. Dostupný z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite.html> (3.3.2010)
- [4] HORVÁTH, E. Problematika obrábění titanových leteckých dílů [online]. Dostupný z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/problematika-obrabeni-titanovych-leteckych-dilu.html> (15.05.2012)
- [5] AVIATION.NET.PL. Kompozyty Dreamlinera [online]. Dostupný z:
http://www.aviation.net.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=224&Itemid=2 (08.07.2010)
- [6] MAJKA, D. Samoloty przyszłości [online]. Dostupný z:
<http://m.wyborcza.pl/wyborcza/1,105407,8203144.html> (2.8.2010)
- [7] JELÍNEK, R., FAJT, V. Systém WheelTug [online]. Dostupný z:
<http://uld.fd.cvut.cz/magazindta/system%20wheeltug.pdf> (22.10.2012)
- [8] ENVIWEB S.R.O. Letecká biopaliva 1. a 2. generace a jiné inovace [online]. Dostupný z:
<http://www.enviweb.cz/clanek/energie/77423/letecka-biopaliva-1-a-2-generace-a-jine-inovace> (23.7.2009)
- [9] DVOŘÁK, V. Návrh křídélka z kompozitního materiálu: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 63s.
- [10] OCZOŚ, K. Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa. Mechanik. 2008, roč. LXXXI, č. 7, s. 9